Untersuchungen am Lummer-Pringsheimschen Spektralflickerphotometer.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der hohen

philosophischen Fakultät der Kgl. Universität Breslau

vorgelegt
und mit ihrer Genehmigung veröffentlicht

von

Hedwig Bender.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Montag, den 11. August 1913, 10 Uhr in der Aula Leopoldina

Vortrag:

Wie weit lassen sich die Gesichtswahrnehmungen durch physikalische Vorgänge im Auge erklären?

und

Promotion.

Breslau 1913
Druck von Graß, Barth & Comp. (W. Friedrich) in Breslau 848 13.

Gedruckt mit Genehmigung der hohen philosophischen Fakultät der Königlichen Universität Breslau.

Referenten: Geheimrat Prof. Dr. Lummer und Prof. Dr. Pringsheim.

Examen rigorosum: 7. Mai 1913.

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 1

I. Teil. Prüfung der Methode 6

§ 1. Helligkeitsmessungen nach der Sehschärfemethode . . . 6

§ 2. Bestimmung der Flimmerwerte mit dem Spektralflicker-photometer 11

a. Apparatbeschreibung 11

b. Messungen 14

§ 3. Vergleich der Sehschärfe- und der Flimmermessungen . . 16

II. Teil. Wiederholung und Ausbau der Arbeiten über die Grundlagen der neuen optischen Pyrometrie 19

§ 1. Die foveale Helligkeitsempfindlichkeit verschiedener normal farbentüchtiger Beobachter 21

a. Spektrale Energiemessungen 22

b. Helligkeitsmessung und Bildung der Empfindlichkeiten 24

§ 2. Die foveale Helligkeitsempfindlichkeit desselben Beobachters zu verschiedenen Zeiten 28

§ 3. Abhängigkeit der pyrometrischen Genauigkeit von den photometrierten Wellenlängen-Paaren 29

a. Flickergenauigkeit bei verschiedenem spektralem Abstand der verglichenen Farben 29

b. Einfluss der Temperaturänderung auf das Helligkeitsverhältnis verschiedener Farbenpaare 31

III. Teil. Rein physiologische Messungen 34

§ 1. Helligkeitsempfindlichkeit total farbenblinder Augen . . 34

§ 2. Helligkeitsempfindlichkeit des normalen Auges bei verschiedenen Graden peripherer Beobachtung 37

Schluss: Zusammenfassung der Ergebnisse 46

Einleitung.

Die vorliegende Arbeit knüpft an eine im hiesigen physikalischen Institut ausgeführte Untersuchung von E. Thürmel[1]) über „das Lummer-Pringsheimsche Spektralflickerphotometer als optisches Pyrometer" an. Sie hatte in erster Linie den rein praktischen Zweck, die dort gewonnene physiologische Grundlage für die Verwendung dieses Apparates in der Pyrometrie zu befestigen und weiter auszubauen. Im Anschluss daran wurden noch einige Untersuchungen von mehr theorethisch-physiologischer Bedeutung ausgeführt.

Für beide Teile der Arbeit ist zuerst die Berechtigung der Flickermethode als einer Methode der heterochromen Photometrie im allgemeinen und die Leistungsfähigkeit des benutzten Spektralflickerphotometers im besonderen zu prüfen.

Solange man es beim Photometrieren mit gleichfarbigen Lichtquellen zu tun hat, ist der direkte Vergleich die nächstliegende und zugleich die genaueste Art der Messung, sei es, dass man die Helligkeiten zweier von den beiden Lichtquellen beleuchteter Flächen unmittelbar, sei es, dass man die Kontraste vergleicht, die sie mit demselben Grunde bilden.

Auch beim Helligkeitsvergleich zwischen verschieden gefärbten Lichtern ist diese Methode an und für sich die einzig berechtigte; denn die „Helligkeit" ist eine einfache physiologische Qualität und kann als solche zunächst nur durch die Stärke der Empfindung gemessen werden, die sie hervorruft. Derartige Einstellungen bieten aber eine eigentümliche Schwierigkeit dar, und die bei ihnen erreichbare Genauigkeit ist selbst für geübte Beobachter so gering, dass von einigen Autoren, z. B. J. v. Kries[2]), sogar die theoretische

[1]) E. Thürmel, Inaugural-Dissert., Breslau 1910. Jahresber. d. Schles. Ges. f. Vaterl. Kultur 1910. Ann. Bd. 33, S. 1139, 1910.

[2]) Nagels Handb. d. Physiol. Bd. III, S. 28 und S. 259.

Möglichkeit, verschieden gefärbte oder gar spektrale Lichter in bezug auf ihre Helligkeit genau zu vergleichen, in Zweifel gezogen worden ist.

Wie dem auch sei, so bleibt in der Praxis die Notwendigkeit der heterochromen Photometrie bestehen. Man hat deshalb den Zustand der photometrischen Gleichheit, der hier zunächst seinen bestimmten Sinn verliert, durch neue Merkmale zu definieren und dadurch Methoden zu begründen versucht, die eine grössere Genauigkeit ermöglichen sollten, als die direkte Schätzung. Die wichtigsten unter ihnen sind die Methoden der Sehschärfe und der Flimmeräquivalenz oder die nach Stuhr[3]) mit der letzteren identische Methode der kritischen Geschwindigkeit.

Das Sehschärfeverfahren beruht auf der von Werner v. Siemens[4]) im Jahre 1877 aufgestellten Definition: „Ein richtiges Photometer sollte verschiedenfarbiges Licht als gleich angeben, wenn es uns in gleicher Weise entfernte Objekte erkennbar machte." Es misst also, wie Siemens hervorhebt, nicht die von den Lichtquellen erzeugte Helligkeitsempfindung, sondern ihren „Beleuchtungswert".

Das sogenannte Flimmerprinzip andrerseits ist von Rood[5]) 1893 begründet worden. Rood definiert, dass ein beliebiges Licht mit demjenigen farbigen oder farblosen Lichte gleich hell ist, mit dem es bei schneller zeitlicher Aufeinanderfolge bei der geringsten Zahl von Wechseln in der Sekunde zu einem einheitlichen „flimmerfreien" Eindruck verschmilzt.

Ausser von Rood selbst ist sein Gedanke später von einer Reihe anderer Forscher zur Helligkeitsmessung, namentlich zwischen verschieden gefärbten Lichtern, verwendet worden, so von Whitman[6]), Schenck[7]), Polimanti[8]), Krüss[9]) und

---

[3]) J. Stuhr, Inaug.-Dissert., Kiel 1908, S. 40.

[4]) W. v. Siemens, Wied. Ann. 2, S. 547. 1877.

[5]) N. Rood, Americ. Journ. of Sc. 46, p. 173. 1893.

[6]) P. Whitman, Phys. Rev. 3, p. 241. 1896.

[7]) Fr. Schenck, Pflügers Arch. f. Physiol. 64, S. 607. 1896.

[8]) O. Polimanti, Ztschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 19, S. 263. 1899.

[9]) H. Krüss, Journ. f. Gasbel. u. Wasserversorg. 47, S. 129. 1904. Phys. Ztschr. 5, S. 65. 1904.

Bechstein[10]), und in neuerer Zeit scheint die Flimmermethode in der heterochromen Photometrie mehr und mehr in den Vordergrund zu treten. Bietet sie doch gegenüber der Sehschärfemethode und dem direkten Vergleich den grossen Vorteil, dass bei ihr gerade der für diese Messungen störendste Umstand, die Verschiedenheit der Farbe, im Augenblick der Einstellung völlig ausgeschaltet ist.

Man hat allerdings auch auf andere Art versucht, photometrische Anordnungen zu treffen, bei denen der Eindruck der Farbe auf diese oder jene Weise beseitigt wird, während die Helligkeitsverhältnisse für das Auge ungeändert bestehen bleiben. Das ist z. B. bei dem Siebeckschen[11]) Verfahren der Minimalfeld-Helligkeiten der Fall. Aber abgesehen davon, dass diese schwierigen Methoden für die Praxis ungeeignet sind, muss bei ihnen die Aufhebung der Farbenunterschiede stets durch irgend welche Erschwerungen anderer Art — hier die räumliche Einschränkung des Photometerfeldes auf einen Minimalbezirk — erkauft werden, die den Gewinn teilweise wieder aufheben. Die Flickermethode ist von solchen störenden Nebenbedingungen frei.

Das Bedenkliche bei beiden erwähnten Methoden ist, dass die Kriterien, die bei ihnen zur Einstellung benutzt werden, zu der physiologischen Qualität der Helligkeit in keiner eindeutigen und ohne weiteres gegebenen Beziehung stehen. Beispielsweise hängt die Sehschärfe ausser von der Helligkeit noch von der Lage der beobachtenden Netzhautstelle und, sobald diese extrafoveal ist, auch von ihrem Adaptationszustande ab; und ferner kann man theoretisch durchaus nicht beweisen, dass zwei „flimmeräquivalente" Lichter gleich hell sein müssen.

Direkter Vergleich, Sehschärfe und Flimmeräquivalenz stellen vielmehr drei von einander unabhängige Arten heterochromer Messungen dar. Erst ein Vergleich der nach allen dreien gefundenen Ergebnisse kann zeigen, ob man überhaupt eine und dieselbe Grösse durch sie alle misst, und

---

[10]) W. Bechstein, Ztschr. f. Instrk. 25, S. 45. 1905 u. 26, S. 249. 1906.
[11]) Siebeck, Ztschr. f. Psych. etc. 41, II. Abt. S. 89. 1907.

wieweit demnach auch die beiden letzten als Methoden der Helligkeitsmessung angesehen werden dürfen.

Solche Prüfungen sind vielfach ausgeführt worden. Eine Entscheidung der Frage haben sie wegen der Unsicherheit dieser Messungen, ihrer Abhängigkeit von vielen nur schwer konstant zu haltenden Bedingungen und der grossen individuellen Unterschiede der Beobachter noch nicht herbeiführen können. Die z. T. entgegengesetzten Urteile verschiedener Beobachter berechtigen aber wohl zu dem Schlusse, dass alle drei Verfahren prinzipiell dasselbe messen, und dass etwaige systematische Abweichungen zwichen ihnen darauf zurückzuführen sind, dass sich bestimmte Fehlerquellen bei der einen Methode stärker als bei der anderen geltend machen.

Die Flimmerphotometrie, auf die es hier hauptsächlich ankommt, ist häufig besonders günstig beurteilt worden. Bereits Schenck[12]) schliesst aus seinen vergleichenden Messungen, es scheine „die Intermittenzmethode die Werte der wirklichen Gesamthelligkeit der Farbe zu liefern, und die Abweichungen dieser Werte von den Werten, die man nach der Methode der direkten Vergleichung erhält, auf Urteilstäuschungen bei der letzteren Methode zu beruhen".

Stuhr[13]) findet die Flimmerwerte zwar von den Sehschärfewerten abweichend, aber nicht in dem Masse, wie die nach der Methode der Flächenhelligkeit gefundenen Werte.

In ausführlichen Untersuchungen vergleicht ferner H. E. Ives[14]) die Flicker- und die Flächenhelligkeitswerte spektraler Lichter. Er findet bei grossen Helligkeiten beide übereinstimmend. Die Abweichungen bei geringen Helligkeitsstufen schreibt er dem Einfluss des Purkinje-Effektes auf die Gleichheitsmethode zu, da nach den Arbeiten von J. S. Dow[15]) die Flickerwerte davon in viel geringerem

---

[12]) Schenck, l. c. p. 628. [13]) J. Stuhr, l. c. p. 51/52.

[14]) H. E. Ives, „Some Spectral Luminosity Curves Obtained by Flicker and Equality of Brightness Photometers", Baltimore 1910. Phil. Mag. 24, p. 149. 1912.

[15]) J. S. Dow, The Electrician 1910, p. 588. Phil. Mag. (6), 19 p. 58. 1910.

Grade betroffen werden — ein weiterer grosser Vorteil dieser Methode.

Einen direkten Vergleich zwischen allen drei Verfahren enthält die Arbeit von E. Thürmel[16]). Dort sind die von Langley[17]) erhaltenen Sehschärfewerte, die von König[18]) bei grossen Helligkeiten nach der Gleichheitsmethode und die von Stiller und Thürmel am Spektralflickerphotometer gewonnenen Werte der Helligkeitsempfindlichkeit im Spektrum graphisch dargestellt. Man versteht hierunter die subjektive Helligkeit, bezogen auf das Normalspektrum und auf konstante Energie, z. B. die Energieeinheit. Alle drei Kurven zeigen annähernd gleichen Verlauf, insbesondere gleiche Lage des Maximums. Auch gelegentliche Einstellungen, die Herr Thürmel an seinem Apparate o h n e Flickern ausführte, zeigen, dass die einfache Schätzung innerhalb der Fehlergrenzen dasselbe ergibt, wie die freilich viel genauere Flickermessung.

Man kann also schliessen, dass das Kriterium der Flickeräquivalenz in der Tat ein Kriterium für Helligkeitsgleichheit ist. Um dies nochmals zu prüfen, und um insbebesondere die Sehschärfe- und die Flickerwerte einmal für ein und dasselbe Auge zu erhalten, wurden trotzdem hierüber zunächst noch neue Versuche angestellt.

---

[16]) E. Thürmel, l. c.

[17]) S. P. Langley, Am. Journ. 36, p. 359. 1888. Phil. Mag. (5), 27 p. 1. 1889.

[18]) A. König, Beitr. z. Psych. u. Physiol. d. S. p. 309. Hamburg 1891. Ges. Abh. zur physiol. Optik p. 144, Leipzig 1903.

I. Teil.

Prüfung der Methode.

Im Spektrum einer und derselben Lichtquelle wurde zuerst die Verteilung der Helligkeitswerte nach der Sehschärfemethode, darauf die Verteilung der Flimmerwerte mit Hilfe des Spektralflickerphotometers bestimmt. Als Lichtquelle diente ein grosser Nernstbrenner, der in ein innen geschwärztes Metallrohr eingeschlossen war. Vor der Öffnung des Rohres stand eine dauernd in gleicher Stellung zu ihm befindliche Mattscheibe. Es wurde also in beiden Fällen das von der Mattscheibe ausgehende Licht untersucht. Die Lampenspannung wurde mit Hilfe eines Voltmeters und Regulierwiderstandes durchweg auf 220 Volt konstant gehalten. Beide Messungsreihen mussten, da bei ihnen verschiedene Prismen verwendet wurden, auf das normale Spektrum reduziert werden. Die reduzierten Reihen müssen übereinstimmen, falls die Flimmerwerte mit den Sehschärfewerten identisch sind.

§ 1.

Helligkeitsmessungen nach der Sehschärfemethode.

Die Sehschärfemessungen sind ähnlich wie bei Langley[1]) so ausgeführt, dass kleine Sehzeichen dem Auge im Lichte der verschiedenen Spektralfarben dargeboten und die Helligkeiten bis zu deren Erkennbarkeit variiert wurden. Die Versuchsanordnung ist aus Figur 1 ersichtlich. Das Licht der Mattscheibe M geht durch den rotierenden Sektor R von Lummer und Brodhun[2]) und wird durch die Linse L_1 auf dem vorderen Spalte S_1 eines gewöhnlichen Spektrometers konzentriert und darauf durch ein Zimtsäure-Gradsichtprisma P von grosser Dispersion in ein

---

[1]) S. P. Langley, Phil. Mag. (5) 27, p. 1. 1889.

[2]) Lummer u. Brodhun, Ztschr. f. Instrk. 16, S. 299. 1896. E. Brodhun, Ztschr. f. Instrk. 24, S. 313. 1904.

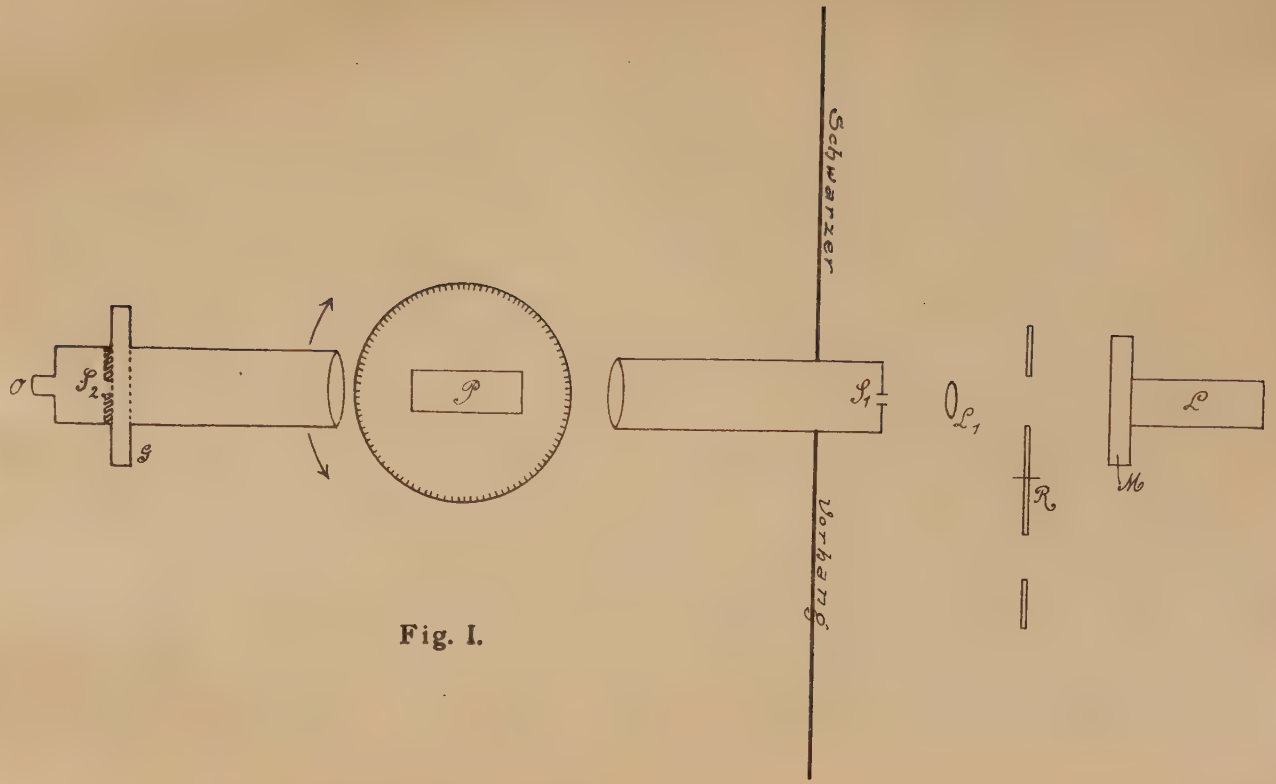


Fig. I.

Spektrum ausgebreitet, das durch die Lupe O des Fernrohres betrachtet wird. Ein in der Ebene des Spektrums befindlicher Spalt S_2 blendet aus diesem einen schmalen Bezirk aus, der durch das stark vergrössernde Okular etwa 3 mm breit erscheint. Unmittelbar an diesem Spalte ist durch zwei Schlitze in den Seitenwandungen des Fernrohres ein schmaler Glasstreifen G mit den Sehzeichen gesteckt.

Die Herstellung geeigneter Sehzeichen gelang erst nach längeren Bemühungen. Anfänglich wurde eine Abbé'sche Testplatte benützt; das ist eine versilberte Glasplatte, in die mikroskopisch feine parallele Linien eingekratzt sind. Durch das Fernrohrokular erschienen die abwechselnd hellen und dunklen Streifen bei starker Beleuchtung gut sichtbar. Doch zeigte es sich, dass bei Einstellung der Erkennbarkeitsgrenze der Beobachter hier sehr grossen Irrtümern ausgesetzt war, da es sich nicht sicher sagen liess, wann die Streifen wirklich eben auflösbar waren. Dieselbe Beobachtung hat kürzlich O. Grosskurth[3]) gemacht, der in seiner Dissertation Vergleiche zwischen der Sehschärfe- und der Gleichheitsmethode beschreibt. Er kommt ebenfalls zu dem Schlusse, „dass das Erkennen einfacher Linien kein genügendes Kriterium für gleiche Sehschärfe ist".

Als das Beste erwies es sich schliesslich, Zahlen aus tiefschwarzem Lackpapier (von etwa 2 cm Höhe), wie sie käuflich zu haben sind, auf sehr weissen Karton zu kleben, der auf ein Reissbrett gespannt wurde, und das ganze zu photographieren, in einer solchen Verkleinerung, dass bei Betrachtung durch das Okular des Spektrometers in dem ausgeblendeten farbigen Felde etwa zwei Ziffern neben einander erschienen. Von der photographischen Platte wurde auf besonders feinkörnigen Diapositivplatten ein gutes Diapositiv hergestellt und aus diesem der Streifen mit den Ziffern herausgeschnitten. Da der Grund der Platte bei der Entwicklung sehr gleichmässig grau geworden war, so wurde angenommen, dass alle Farben beim Durchgange durch die Platte im gleichen Verhältnis geschwächt wurden. Mit grosser Annäherung war dies sicher der Fall, jedenfalls aber

[3]) O. Grosskurth, Inaug.-Dissert., Marburg 1910, S. 63.

mit einer für diese sehr schwierigen Messungen ausreichenden Genauigkeit. Der Glasstreifen mit den Sehzeichen liess sich in den beiden Schlitzen des Fernrohres horizontal verschieben, so dass immer andere Ziffern in das Gesichtsfeld gebracht werden konnten.

Durch Verschieben des Fernrohres längs des Teilkreises konnte jedes beliebige Spektralgebiet ausgeblendet werden. Die Fernrohrstellung liess sich bis auf 3" genau ablesen. Vor den Messungen musste der Apparat geeicht, d. h. die Dispersionskurve des Prismas aufgenommen werden. Dies geschah mit Hilfe der Heräus'schen Quarz-Quecksilber-Lampe, die ein sehr linienreiches Spektrum liefert. Ausserdem wurde die Stellung der Na- und Li-Linie bestimmt. Da die Dispersion von Flüssigkeitsprismen sich mit der Temperatur stark verändert, so wurde eine Kurve v o r und eine zweite n a c h den eigentlichen Messungen aufgenommen. Beide wichen nur sehr wenig voneinander ab. Das Mittel daraus wurde der Wellenlängenbestimmung zugrunde gelegt.

Der Verlauf der Messungen war folgender: Das Fernrohr wurde zunächst auf die zu photometrierende Wellenlänge eingestellt und der vordere Spalt S_1 des Spektrometers so weit geöffnet, dass ohne die Schwächung durch den Sektor die Zahlen noch gut zu lesen waren. Der Spalt blieb dann während der betreffenden Einstellungsreihe unverändert, und die feinere Abstufung erfolgte durch Verändern der Sektoröffnung. Diese wurde anfangs so eng gemacht, dass nichts mehr zu erkennen war, darauf ganz allmählich geöffnet, bis die Ziffern eben gelesen werden konnten (erste Grenze). Diese Schwelle wurde alsdann beträchtlich überschritten, bis die Zahlen ganz deutlich waren, und das Licht dann umgekehrt wieder geschwächt, bis die Erkennbarkeit aufhörte (zweite Grenze). Beide, die obere und die untere Grenze, wurden an jeder der gemessenen Spektralstellen durch dreimalige Einstellung bestimmt, und der Mittelwert aus allen sechs Werten wurde als d i e Schwelle kurzweg angenommen.

Die Sektoröffnung konnte von 0 bis zweimal 90° geändert werden. Die Breite jeder Öffnung ist jedoch nicht in Graden, sondern in kleineren Winkeleinheiten (neue Gradteilung) an-

gegeben. Es ist nämlich der ganze Kreis in 400 Teile geteilt. Ein Nonius gibt noch die Hundertstel dieser Teile an.

Der vordere Spalt des Spektrometers, S_1, ist in seiner Breite durch eine Mikrometerschraube mit Trommelablesung zu verändern. Der Umfang der Trommel ist in 50 Teile geteilt und entspricht einer Spaltbreite von 0,5 mm.

Die Sehschärfemethode setzt ihrer Definiton nach voraus, dass bei der Erkennbarkeitsgrenze der Zahlen alle Farben gleich hell sind. Aus den Sektor- und Spaltöffnungen, die für die einzelnen Farben bei dieser Grenze eingestellt werden mussten, kann man daher rückwärts ihr wahres Helligkeitsverhältnis in dem von der Mattscheibe ausgesandten, ungeschwächten Lichte berechnen.

Es habe z. B. bei Einstellung des Schwellenwertes für eine Farbe 1 jede der beiden gleichen Sektoröffnungen die Grösse α_1 und der Spalt die Breite b_1. Für eine Farbe 2 seien die entsprechenden Grössen α_2 und b_2. Sind die wahren Helligkeiten der Farben in dem von der Scheibe ausgehenden Lichte H_1 und H_2, so werden sie also durch den Sektor allein geschwächt auf

$$H_1' = H_1 \cdot \frac{2\,\alpha_1}{400} = \frac{\alpha_1}{200}\ H_1 \text{ und } H_2' = H_2 \cdot \frac{2\,\alpha_2}{400} = \frac{\alpha_2}{200} \cdot H_2.$$

Dies sind die Helligkeiten, die auf den Spalt S_1 treffen. Da sie nach dem Durchgange durch den Spalt gleich sind, muss

$$H_2' = H_1' \cdot \frac{b_1}{b_2}$$

sein, oder

$$H_2 \cdot \frac{\alpha_2}{200} = H_1 \cdot \frac{\alpha_1}{200} \cdot \frac{b_1}{b_2}$$

$$H_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot H_1.$$

Setzt man die ungeschwächte Helligkeit H_1 einer der photometrierten Farben willkürlich fest, so kann man die aller anderen relativ zu der ersten hiernach berechnen. Es ist im Folgenden die Helligkeit der hellsten gemessenen Wellenlänge gleich 10 000 gesetzt.

Die Reihenfolge der Messungen war so, dass im äussersten Violett, als der dunkelsten Spektralgegend, be-

gonnen wurde. Dann folgte die äusserste rote Wellenlänge und darauf abwechselnd die nächste Wellenlänge vom blauen und die nächste vom roten Ende, nach der Mitte des Spektrums fortschreitend. Es sollte dadurch möglichst die Ermüdung des Auges durch dieselbe Farbe vermieden werden.

Auf gute Dunkeladaptation des Auges wurde sorgfältig geachtet, damit jede Einstellung in möglichst ausgeruhtem Zustande begonnen wurde. Der Beobachter war von der Lichtquelle während der Messungen durch einen schwarzen Vorhang getrennt, durch den das Kollimatorrohr des Spektralapparates hindurchgeführt war. Alle erforderlichen Handgriffe und Ablesungen am Fernrohr, Spalt und Sektor machte ein Mitarbeiter hinter dem Vorhang beim Lichte einer kleinen verdunkelten Ableselampe. Für die freundlichen und mühevollen Hilfeleistungen bei diesen Messungen sage ich Herrn cand. phil. F. Küstner hier nochmals meinen herzlichen Dank.

Die Rotationsgeschwindigkeit des Sektors musste so gross genommen werden, dass der Lichteindruck vollständig ruhig war.

Die Messungsergebnisse sind in Tabelle 1 verzeichnet. Kolonne 5 enthält die gefundenen Helligkeitswerte, Kolonne 6 ihre Logarithmen.

Um die Helligkeitsverteilung auf das Normalspektrum beziehen zu können, hat man jeden Helligkeitswert noch mit dem zugehörigen Reduktionsfaktor R zu multiplizieren. Dieser ist dem Anstieg der Dispersionskurve umgekehrt proportional, also wenn n die zur Wellenlänge λ gehörige Fernrohrstellung ist,

$$R = c \cdot \frac{1}{d\lambda / dn}.$$

Da es nur auf die relativen Werte der Helligkeit ankommt, kann man $c = 1$ setzen, d. h.

$$R = \frac{dn}{d\lambda}.$$

Sind λ_1 und λ_2 zwei nahe benachbarte Wellenlängen, so ist für ihr arithmetisches Mittel dieser Differentialquotient

annähernd durch den Differenzenquotienten $\frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ zu ersetzen. Indem $\lambda_2 - \lambda_1$ gleich 10 μμ genommen wurde, sind hiernach die Werte von R für die gemessenen Wellenlängen aus der Dispersionskurve entnommen worden. Ihre Logarithmen zeigt Kolonne 7. In Kolonne 8 sind damit die Logarithmen der reduzierten Helligkeiten berechnet. Schliesslich sind diese in der letzten Kolonne noch sämtlich um den Wert 0,932 vermindert, um für $\lambda = 580$ μμ die hier gefundene logarithmische Helligkeit gleich dem unten berechneten logarithmischen Flimmerwert (s. Tab. 5) zu machen. Diese Operation bedeutet nur ein Dividieren aller reduzierten Helligkeiten durch einen konstanten Divisor, ändert also die relative Verteilung nicht.

In Tafel I sind die Wellenlängen als Abszissen aufgetragen; Kurve 1 zeigt die zugehörigen Werte der letzten Kolonne als Ordinaten.

§ 2.

Bestimmung der Flimmerwerte mit dem Spektralflickerphotometer.

a. Apparatbeschreibung.

Das Spektralflickerphotometer ist ausser von Lummer und Pringsheim[4]) selbst bereits von E. Thürmel in der erwähnten Dissertation ausführlich beschrieben worden. Zum Verständnis des folgenden muss seine Beschreibung hier nochmals wiederholt werden (s. Figur 2).

Der Apparat unterscheidet sich von allen anderen Spektralflickerphotometern dadurch, dass er zwei Farben im Spektrum einer und derselben Lichtquelle unmittelbar, ohne Zuhilfenahme eines Zwischenlichtes, miteinander zu vergleichen gestattet. Dies wird auf folgende Weise erreicht.

Von der Lampe L mit Mattscheibe M wird das Licht durch zwei totalreflektierende Prismen P_I und P_{II} auf die beiden nebeneinander stehenden vertikalen Spalte S_I und

---

[4]) O. Lummer und E. Pringsheim, Jahresber. d. Schles. Ges. f. Vaterl. Kultur. 1906. Beibl. 1907, S. 466.

S_{II} des Kollimatorrohres geworfen. Durch die Linsen L_1 und L_2 werden die Spalte in der Brennebene der Okularlinse L_3 scharf abgebildet. Das Prisma P breitet diese Bilder in zwei Spektren aus, die seitlich gegeneinander verschoben sind und sich teilweise überlagern. Das von Spalt S_I kommende Licht erzeugt das Spektrum von v_I bis r_I, das von S_{II} kommende das Spektrum von v_{II} bis r_{II}. Ein in ihrer Ebene befindlicher vertikaler Okularspalt O blendet bei einer bestimmten Stellung des Beobachtungsfernrohres aus jedem der beiden Spektren eine ganz bestimmte Farbe aus. Vor den Spalten S_I und S_{II} rotiert nun um die totalreflektierenden Prismen herum eine durch einen Elektromotor getriebene geschwärzte Blechtrommel, deren Achse horizontal und senkrecht zur Achse des Spaltrohres ist. Der Umfang der Trommel ist so mit Ausschnitten von je 90° versehen, dass die beiden Spalte immer abwechselnd geöffnet und abgeblendet werden. Während jeder Trommelumdrehung wird also jeder Spalt zweimal geöffnet und zweimal geschlossen. Die in O ausgeblendeten Farben erscheinen infolgedessen nicht mehr gleichzeitig, sondern abwechselnd. Bei genügend schneller Rotation verschmelzen sie zu einer konstanten Mischfarbe; doch bleibt auch dann noch das Flimmern bestehen, so lange die Farben nicht „flimmeräquivalent" sind. Die Flimmeräquivalenz kann durch Verändern der Spaltbreite S_I oder S_{II} bewirkt werden. Dazu dienen zwei Mikrometerschrauben mit Trommelablesung T_I und T_{II}. Der Umfang jeder Trommel ist in 100 Teile geteilt und entspricht einer Spaltbreite von 0,25 mm. Bei der Einstellung verhalten sich die wahren Flimmerwerte der beiden Farben umgekehrt wie die zugehörigen Spaltbreiten. Durch Verschiebung des Fernrohres können immer andere und andere Farbenpaare in das Gesichtsfeld gebracht werden.

Ist die Lichtquelle so justiert, dass die beiden zur Achse A des Kollimatorrohres symmetrisch liegenden Spalte S_I und S_{II} genau gleich stark beleuchtet sind, so sind die beiden Spektren durchaus gleichwertig; man vergleicht dann praktisch auf dem Photometerfelde zwei Farben d e s s e l b e n Spektrums miteinander.

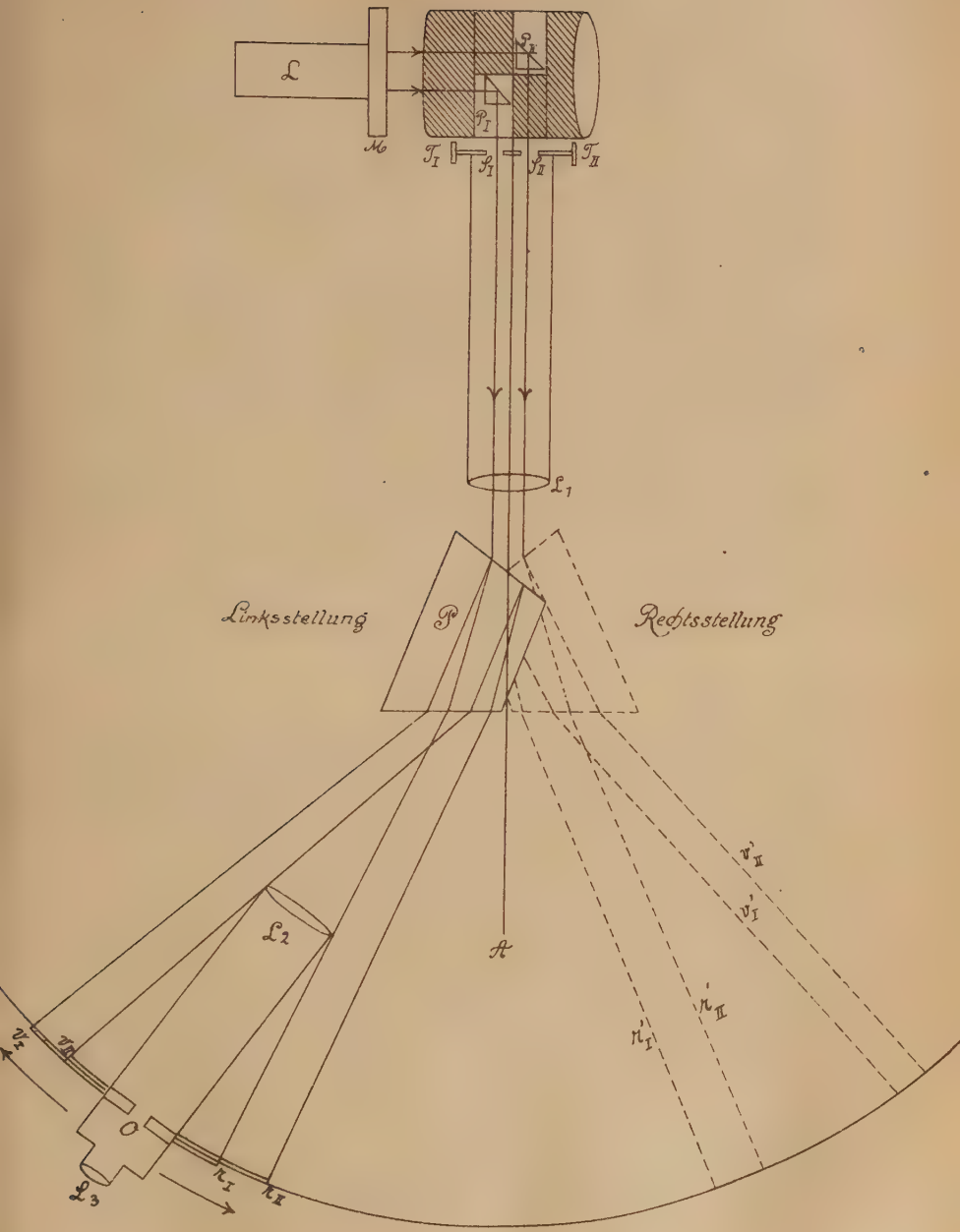


Fig. II.

Es handelt sich also in erster Linie darum, diese richtige Stellung der Lampe zu finden. Die beiden Spalte werden dazu gleich breit gemacht, und das Fernrohr wird durch die Spektren verschoben, bis zu der Stelle, an der das Flickern bei der geringsten Tourenzahl verschwindet. Die dort ausgeblendeten Farben sind flimmeräquivalent.

Prisma und Fernrohr des Apparates lassen sich nun aus der in Figur 2 dargestellten „Linksstellung" in die dazu in bezug auf die Achse A symmetrische „Rechtsstellung" umlegen. Dadurch vertauschen die Spalte S_I und S_{II} ihre Rollen. Während nämlich bei Linksstellung die Farbe von grösserer Wellenlänge von Spalt I kommt, liefert bei Rechtsstellung immer Spalt II die längerwellige der beiden verglichenen Farben. Auch bei dieser Stellung sucht man durch Verschieben des Fernrohres die beiden flimmeräquivalenten Wellenlängen auf. Ergeben sie sich ebenso, wie in der Linksstellung, so sind beide Spalte gleich hell beleuchtet. In Wirklichkeit konnte dies fast niemals genau erreicht werden. Es wurde deshalb die Verteilung der Flimmerwerte im Spektrum bei Links- und Rechtsstellung gemessen, und aus beiden Messungsreihen wurden die Mittelwerte gebildet. Der Fehler hebt sich dadurch heraus.

Um mit dem Flickerphotometer systematische Messungen ausführen zu können, muss man die zu jeder beliebigen Fernrohrstellung in beiden Spektren gehörigen Wellenlängen kennen. Diese Eichung wurde für jeden der Spalte in der üblichen Weise ausgeführt, indem der andere Spalt geschlossen und das Fernrohr mittels einer Mikrometerschraube so eingestellt wurde, dass die verschiedenen vom ersten Spalt erzeugten Spektrallinien der Heräus'schen Quecksilberlampe in die Mitte des Okularspaltes rückten. Die Fernrohrstellung konnte auf einer Skala und Trommel abgelesen werden. Einer Verschiebung des Fernrohres um einen Trommelteil entsprach eine Änderung der Wellenlänge um höchstens 0,3 μμ im roten und 0,1 μμ im violetten Spektralgebiet. Trägt man für jeden der Spalte die Wellenlängen als Ordinaten, die zugehörigen Fernrohrstellungen als Abszissen in ein Koordinatensystem ein, so erhält man zwei übereinanderliegende Dispersionskurven, aus denen man für

jede Fernrohrstellung die beiden vergleichbaren Farben ablesen kann.

Der Abstand der beiden Spalte betrug für gewöhnlich 2 mm. Um auch weiter auseinanderliegende Farben miteinander vergleichen zu können, kann man ihn aber durch besondere neu einzufügende Blenden auf 4, 6, 8, 10 oder 12 mm bringen. Dies hat natürlich eine Verschiebung der Dispersionskurven zur Folge. Im Folgenden ist immer mit dem engsten Spaltabstande von 2 mm gearbeitet worden, wo nicht ausdrücklich etwas anderes bemerkt ist.

b. Messungen.

Die Verteilung der Flimmerwerte war für das Spektrum derselben Nernstlampe zu bestimmen, die bei den Sehschärfemessungen verwendet worden war.

Da die Sehschärfemessungen das Erkennen kleiner Zeichen forderten, war man dort ziemlich sicher, mit den beim Fixieren stets wirksamen zentralen Netzhautstellen zu beobachten. Bei den Flickermessungen musste dafür besonders gesorgt werden. Der Okularspalt wurde deshalb so eng gemacht, dass er unter einem Gesichtswinkel von etwa 2^0 erschien. Bei scharfem Fixieren bedeckt das Bild des Photometerfeldes dann nur den stäbchenfreien Teil der Netzhaut. Die erhaltenen Flimmeräquivalenzwerte sind also die für die Netzhautzapfen gültigen. Da die Höhe des Spaltes grösser war als seine Breite, kam es einige Male vor, dass am oberen und unteren Rande das Flickern noch merkbar war, wenn es in der fixierten Mitte bereits verschwunden war, oder umgekehrt. Es wurde deshalb in allen Fällen auf die Mitte des Feldes eingestellt.

Das Durchmessen des Spektrums geschieht nun so, dass man zuerst, wie oben beschrieben, für Rechts- und Linksstellung diejenige Fernrohrstellung aufsucht, bei der in den gleichbreiten Spalten I und II die flimmergleichen Farben λ_I und λ_{II} erscheinen. Hierfür wurden jedesmal zwei Reihen von je zehn Einstellungen beobachtet, und zwar bei zwei verschiedenen Spaltbreiten, damit das Ergebnis von etwaigen Fehlern in den Nullstellungen der Spalte möglichst unabhängig würde. Diese Messungen enthält Tabelle 2a

und b[5]). Man sieht, dass die flimmergleichen Wellenlängen für die Rechtsstellung von denen bei Linksstellung um 6 bis 7 μμ verschieden sind, d. h. die Lampe beleuchtet die beiden Spalte nicht genau gleich stark. Durch längere Bemühungen hätte dieser Unterschied zwar bedeutend verringert werden können, wie sich bei den späteren Messungen zeigen wird. Da jedoch die bei den Sehschärfemessungen erreichbare Genauigkeit weit geringer war, als die der Flickermessungen, und da der Fehler durch die doppelseitige Messung zudem aufgehoben wird, ist auf die Justierung hier nicht ganz soviel Mühe verwendet worden, wie späterhin.

Die „kritische" Umdrehungszahl pro Minute ist in den Tabellen jedesmal mit angegeben. Sie wächst im grossen und ganzen mit der Helligkeit und sinkt namentlich nach dem violetten Ende hin stark ab. Eine klare Gesetzmässigkeit zeigt sich dabei aber nicht. Vielmehr habe ich stets den Eindruck gewonnen, dass die Schärfe der Einstellung gegen Änderungen der Wechselzahl nicht sehr empfindlich ist.

Mit Hilfe der Dispersionskurven kann nun die Fernrohrstellung bestimmt werden, bei der die anfänglich in Spalt II befindliche Farbe λ_{II} nach Spalt I rückt, und ebenso die neue Wellenlänge λ_{III}, die dabei in Spalt II erscheint. Für dieses neue, jetzt fest eingestellte Farbenpaar beseitigt man das Flimmern durch Verändern einer Spaltbreite. Hat man die Flimmerwerte der beiden ersten Farben, λ_I und λ_{II}, willkürlich festgesetzt, so ergibt sich der Flimmerwert von λ_{III} aus dem von λ_{II} und dem eingestellten Verhältnis der Spaltbreiten. Die beiden gleichen Flimmerwerte F_{λ_I} und $F_{\lambda_{II}}$ sind gleich 10 000 gesetzt worden.

In derselben Weise schreitet man weiter fort, bis man das Spektrum nach beiden Enden hin durchmessen hat. Tabelle 3 a und b enthalten die Ergebnisse dieser Messungen. An jeder Stelle wurden fünf Einstellungen gemacht. In Tabelle 4 sind die Logarithmen der gefundenen Flimmerwerte berechnet. Sie sind als Funktion der Wellenlänge auf

[5]) Die Tabellen sind grossenteils wie bei Thürmel angeordnet worden, um den Vergleich beider Arbeiten zu erleichtern.

Tafel I dargestellt; Kurve 2 gibt die Verteilung der Flimmerwerte für Rechtsstellung, Kurve 3 für Linksstellung wieder.

In der nächsten Tabelle, 5, sind in Kolonne 2 und 3 die aus ihnen graphisch entnommenen Werte von log F_λ gegeben, die zu den in Kolonne 1 bezeichneten Wellenlängen gehören. Mit Hilfe der Gauss'schen Summen-Logarithmen ist daraus in Kolonne 4 der Logarithmus des mittleren Flimmerwertes gebildet. Die Logarithmen der Reduktionsfaktoren in der 5. Kolonne sind wie bei den Sehschärfemessungen aus den Dispersionskurven entnommen worden. Kolonne 6 enthält die Logarithmen der auf das Normalspektrum reduzierten Flimmerwerte. Sie sind auf Tafel I in Kurve 4 dargestellt.

§ 3.

Vergleich der Sehschärfe- und der Flimmermessungen.

Vergleicht man auf Tafel I die Kurven 1 und 4 miteinander, so wird man trotz mancher Unterschiede schliessen müssen, dass die Verteilung der Flimmerwerte im Spektrum mit der nach der Sehschärfemethode gemessenen Helligkeitsverteilung identisch ist. Das Maximum liegt in beiden Fällen bei 580 bis 590 μμ, und die vorhandenen Abweichungen der Flimmerwerte von den Sehschärfewerten erfolgen bald im einen, bald im andern Sinne. Ob ihnen eine reale Existenz zukommt, muss dahingestellt bleiben, so lange nicht Mittel gefunden werden, die Sehschärfemessungen empfindlicher als bisher zu gestalten. Denn leider sind diese Einstellungen nur mit einer sehr mässigen Genauigkeit ausführbar. Von einem prinzipiellen Unterschiede, wie ihn Stuhr[6]) zwischen den beiden Methoden findet, kann hiernach jedenfalls nicht die Rede sein.

Die vorstehenden Messungen sind demnach innerhalb der erreichbaren Genauigkeitsgrenzen eine Bestätigung der Rood'schen Annahme, dass die Flimmeräquivalenz ein Merkmal für die gleiche Helligkeit verschiedenfarbiger Lichter ist. Zugleich erkennt man aber auch, dass die Flimmermethode in vieler Hinsicht vor den

---

[6]) Stuhr, l. c. p. 51.

übrigen Arten der heterochromen Photometrie den Vorzug verdient. Schon der viel glattere Verlauf der Flickerkurven zeigt, dass die Einstellungen hier sicherer sind als bei den Sehschärfemessungen. Dem entspricht auch subjektiv die Empfindung viel grösserer Schwierigkeiten bei den letzteren Einstellungen. Die grosse Sicherheit und Leichtigkeit der Flimmermessungen wird von vielen Beobachtern hervorgehoben, und zwar nicht nur gegenüber den Sehschärfemessungen, sondern auch gegenüber der Methode des direkten Vergleichs, die wohl immer noch die gebräuchlichste, auch beim Vergleich verschiedenfarbiger Lichter, ist. So von Rood[7]), Whitman[8]) und Ives[9]). Über die Genauigkeit des Lummer-Pringsheimschen Spektralflickerphotometers werden weiter unten noch ausführliche Angaben zu machen sein.

Dow[10]) hat ferner gezeigt, dass Einstellungen am Flickerphotometer in viel geringerem Grade von dem Abstand des Auges vom Photometerfelde abhängig sind, als solche an Gleichheitsphotometern.

Dass auch der Purkinje-Effekt bei den Flickermessungen von geringerem Einfluss ist, als sonst, wurde bereits erwähnt. Für das Lummer-Pringsheimsche Spektralflickerphotometer trifft dies besonders noch deshalb zu, weil hier das Gesichtsfeld so klein ist, dass es beim Fixieren praktisch nur den stäbchenfreien Netzhautteil deckt. Die Messungen sind demnach hier vom Adaptationszustande des Auges gar nicht, oder nach Tschermak[11]) doch nur in sehr geringem Masse abhängig. Dies ist deshalb wichtig, weil die Helligkeit an den Enden des Spektrums sehr viel kleiner ist, als im mittleren Teile. Käme das Purkinje-Phänomen dabei zur Geltung, so erhielte man, wenn man in der angegebenen Weise das ganze Spektrum durchmisst, nicht die Kurve der

---

[7]) N. Rood, Phys. Ztschr. 1, p. 269. 1900. Am. Journ. of Sc. (4) 8, p. 194. 1899.

[8]) P. Whitman, l. c. [9]) H. E. Ives, l. c. [10]) J. S. Dow, l. c.

[11]) A. Tschermak, „Beobachtungen über die relative Farbenblindheit im indirekten Sehen", Pflügers Archiv 82, S. 589. 1900. Vergl. auch J. v. Kries „Kritische Bemerkungen zur Farbentheorie", Ztschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. 19 S. 189. 1899.

wahren Helligkeitsverteilung für die Zapfen, sondern eine Zwitter-Kurve. Denn man fände im hellsten Teile des Spektrums dann die Helligkeitsverhältnisse der Farben so, wie sie der dort herrschenden hohen Beleuchtungsstärke entsprechen, beim Fortschreiten nach den dunkleren roten und violetten Teilen aber Verhältnisse, wie sie viel geringeren Helligkeitsstufen zukommen. Dies ist nicht der Fall. Der einzige Nachteil, der sich aus dem Helligkeitsabfall an den Enden des Spektrums ergibt, ist vielmehr ein damit parallel gehendes geringes Abnehmen der Einstellgenauigkeit, wie sich später zeigen wird.

II. Teil.

Wiederholung und Ausbau der Arbeiten über die Grundlagen der neuen optischen Pyrometrie.

Auf der Möglichkeit, mittels des Spektralflickerphotometers das Helligkeitsverhältnis zweier Farben im Spektrum derselben Strahlungsquelle zu messen, beruht seine Anwendung in der Pyrometrie. Man kann die Temperatur eines strahlenden Körpers aus seiner spektralen Helligkeitsverteilung zwar nicht direkt bestimmen. Dagegen besteht nach dem Wien-Planck'schen Gesetze ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der „schwarzen" Temperatur und der spektralen Energieverteilung des Körpers. Um mittelbar auch die Helligkeit mit der Temperatur in Beziehung zu bringen, braucht man demnach nur noch die Beziehung zu kennen, die zwischen der Helligkeit und der Energie an jeder Stelle des Spektrums besteht. Sie kann experimentell ermittelt werden. Dabei zeigt sich, dass eine und dieselbe Menge Strahlungsenergie vom Auge ganz verschieden bewertet wird, je nachdem, in welchem Wellenlängengebiet sie auftritt. Das Verhältnis der Helligkeit H_λ zur physikalischen Intensität J_λ ist also eine Funktion der Wellenlänge. Man bezeichnet es als die Helligkeitsempfindlichkeit E_λ des Auges für die Wellenlänge λ:

$$\frac{H_\lambda}{J_\lambda} = E_\lambda.$$

Die Empfindlichkeit ist, wie man auch sagen kann, zahlenmässig gleich der Helligkeit, mit der die Energieeinheit an der betreffenden Spektralstelle empfunden wird. So wurde sie oben bereits kurz definiert. Während sowohl die Helligkeits- wie die Energieverteilung immer nur für eine gegebene Lichtquelle von ganz bestimmter Temperatur gilt, ist die Verteilung der spektralen Empfindlichkeitswerte von der Natur der benutzten Lichtquelle und innerhalb weiter Grenzen

auch von der Temperatur, d. h. von der Intensität, unabhängig. Jenseits dieser Grenzen macht sich die Änderung der Empfindlichkeit als Purkinjesches Phänomen bemerkbar. Bei streng fovealer Beobachtung tritt sie überhaupt nicht ein.

Die relativen Helligkeiten H_λ der verschiedenen Farben lassen sich, wie oben gezeigt wurde, mit dem Spektralflickerphotometer messen. Die Verteilung der Energiewerte J_λ ist ebenfalls messbar. Man kann daher die relativen Werte der Empfindlichkeit E_λ durch das ganze Spektrum hindurch finden und graphisch darstellen.

Ist umgekehrt für einen Beobachter die Helligkeitsempfindlichkeitskurve einmal bekannt, und bestimmt er das Verhältnis der Helligkeiten an zwei Spektralstellen λ_1 und λ_2, so ist das Verhältnis der Energien an diesen beiden Stellen,

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{H_1 \cdot E_2}{H_2 \cdot E_1'}$$

ebenfalls bekannt. Ändert sich die Temperatur, so ändert die Energiekurve der schwarzen Strahlung ihre Gestalt, und zwar so, dass sich mit steigender Temperatur ihr Maximum nach den kurzen Wellen hin verschiebt. Das Energieverhältnis der beiden Farben ändert sich dabei entsprechend; jedem Werte von $\frac{J_1}{J_2}$ ist eine ganz bestimmte „schwarze" Temperatur zugeordnet.

Das Verhältnis $\frac{H_1}{H_2}$ wird nun mit dem Lummer-Pringsheimschen Spektralflickerphotometer direkt eingestellt. Für die Bestimmung des Energieverhältnisses, d. h. für die praktische Verwendbarkeit des Apparates als Pyrometer, ist also neben der Prüfung der dabei erreichbaren Genauigkeit die Untersuchung über die Helligkeitsempfindlichkeit E von grundlegender Bedeutung.

Nach den neueren Ergebnissen der physiologischen Optik, besonders den zahlreichen Arbeiten von J. v. Kries[1]),

[1]) J. v. Kries, „Über die Funktion der Netzhautstäbchen", Ztschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. 9 S. 81. 1896.

O. Lummer[2]) und W. Nagel[3]) hat man bei allen optischen Untersuchungen darauf zu achten, ob die wirksamen Netzhautelemente die total farbenblinden Stäbchen oder die farbenempfindlichen Zapfen sind. Für das Sehen im Hellen sind beim normalen Auge die letzteren ausschlaggebend. Die Mitwirkung der Stäbchen ist demgegenüber zu vernachlässigen. Sie kommt ausserdem um so weniger in Betracht, je mehr zur Beobachtung die zentralen, stäbchenfreien Partien der Netzhaut benützt werden. Für das Spektralflickerphotometer, wo die Beobachtung mit der fovea allein ausgeführt wird, kommt es deshalb nur auf die Empfindlichkeit der Zapfen an, unabhängig von der Beleuchtungsstärke, die übrigens bei den optisch-pyrometrischen Messungen, wo man es mit leuchtenden Körpern von sehr hohen Temperaturen zu tun hat, meist gross sein wird.

§ 1.

Die foveale Helligkeitsempfindlichkeit verschiedener normal farbentüchtiger Beobachter.

Vor allem handelt es sich darum, festzustellen, ob die den fovealen Netzhautstellen entsprechende Empfindlichkeitskurve für verschiedene normale Augen denselben Verlauf zeigt. Zur Entscheidung dieser Frage können die von früheren Beobachtern bestimmten Empfindlichkeitskurven nur insoweit herangezogen werden, als sie mit Sicherheit als die Empfindlichkeitskurven der Zapfen gelten können. Dies trifft bei der Langleyschen Sehschärfekurve und bei der Königschen Kurve der grössten Helligkeitsstufe zu; ausserdem bei den von Stiller und Thürmel am Spektralflickerphotometer gefundenen Kurven und bei der von H. E. Ives[4]) angegebenen, die auf ganz ähnlichem Wege gewonnen wurde. (Dagegen sind z. B. die von Pflüger[5]) für

[2]) O. Lummer, „Über Grauglut und Rotglut", Wied. Ann. 62 S. 14. Verh. d. Phys. Ges. 16, S. 121. 1897. „Experimentelles über das Sehen im Hellen und Dunkeln", Verh. d. D. Phys. Ges. 6 S. 62. 1904.

[3]) Vergl. Helmholtz, „Physiol. Optik" 3. Aufl. 1911, Bd. 2, herausgeg. von v. Kries, mit Zusätzen von v. Kries u. Nagel.

[4]) H. E. Ives, l. c.

[5]) A. Pflüger, „Über die Farbenempfindlichkeit des Auges", Drudes Ann. 9, S. 185. 1902.

neun verschiedene Beobachter angegebenen Empfindlichkeitskurven, da sie „bei den Schwellenwerten der Reizempfindung" gemessen sind, sämtlich mehr oder weniger „Stäbchenkurven"). Die fünf erwähnten Zapfenkurven zeigen von einander beträchtliche Abweichungen, besonders die von Ives einerseits, von Stiller und Thürmel andrerseits nach der Flickermethode erhaltenen, obgleich ihnen wohl die genauesten Messungen zugrunde liegen. Zu einem allgemeinen Schluss über die individuellen Verschiedenheiten normaler farbentüchtiger Augen kann aber erst ein grösseres Material berechtigen. Ich habe deshalb die Empfindlichkeit nach der bei E. Thürmel verwendeten Methode für mein eigenes Auge und für neun andere Beobachter von normalem Farbensinn bestimmt. Das Ergebnis ist im Folgenden mitgeteilt.

a. Spektrale Energiemessungen.

Der Einfachheit wegen mögen für sämtliche bei diesen Untersuchungen benützte Lichtquellen zunächst die Energiemessungen vorausgeschickt werden.

Es waren im ganzen drei verschiedene Nernstbrenner, A, B und C, mit je einer zugehörigen Mattscheibe. Jede solche Kombination aus Lampe und Scheibe blieb bei allen Messungen, die daran vorgenommen wurden, in sich unverändert. Immer wurde das von der Mattscheibe ausgestrahlte Licht untersucht.

Die Lampen brannten durchweg mit einer Spannung von 220 Volt, die durch ein gutes Voltmeter und Regulierwiderstand konstant gehalten wurde. Damit ihre Strahlung während der Dauer aller Messungen möglichst unverändert bliebe, waren sie vor dem Gebrauch mehrere Stunden lang bei voller Belastung gebrannt worden.

Die Strahlung der Mattscheibe wurde mit Hilfe des Martens-Königschen Spektralphotometers[6]) mit der des Lummer-Kurlbaumschen schwarzen Körpers[7]) verglichen.

---

[6]) Martens u. Grünbaum, „Über eine Neukonstruktion des König'schen Spektralphotometers". Drudes Ann. 4 Bd. 12, S. 984. 1903.

[7]) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Verh. d. Phys. Ges. Berlin 17, S. 106. 1898. Drudes Ann. 5, S. 829. 1901.

Die Helligkeiten beider verhalten sich an einer bestimmten Spektralstelle wie ihre Energien an derselben Stelle. Da die Temperatur des schwarzen Körpers durch das in ihm befindliche Thermoelement gemessen werden kann, lässt sich seine Energiekurve (S_λ), soweit sie ins sichtbare Spektralgebiet fällt, nach der Wienschen Strahlungsgleichung berechnen. Herrn cand. phil. P. Hahn, der mir einige dieser Isothermen berechnen half, sage ich dafür den besten Dank. Aus dem Verhältnis der Helligkeiten ergibt sich dann auch die Energieverteilung (J_λ) im normalen Spektrum der Mattscheibenstrahlung. Ist α der Winkel, um den das Nicholsche Prisma des Spektralphotometers gedreht werden musste, um die von der Lampe und dem schwarzen Körper beleuchteten Gesichtsfeldhälften gleich hell zu machen, so war

$$J_\lambda = S_\lambda \cdot tg^2\alpha.$$

Der grosse, von der Firma Heräus gelieferte schwarze Körper erforderte im Gegensatz zu dem früher von Herrn Thürmel benutzten zu seiner Heizung verhältnismässig geringe Stromstärken (ca. 20 Amp.). Auch war seine Öffnung so gross, dass die Strahlung das Gesichtsfeld des Spektralflickerphotometers wohl auszufüllen vermochte. Wenn trotzdem der schwarze Körper nicht direkt mit dem Flickerphotometer untersucht, sondern die Nernstlampe als Zwischenlichtquelle eingeschoben wurde, so hatte dies darin seinen Grund, dass selbst bei den höchsten Temperaturen, auf die man den schwarzen Körper ohne Gefahr bringen konnte (1600 bis 1700 ° absolut) seine Strahlungsintensität im Blau und Violett noch zu gering war, als dass man genaue Flickermessungen daran ausführen konnte.

In den folgenden Tabellen ist der Logarithmus der physikalischen Intensität J_λ berechnet. Für Lampe B ist die Messung nur bei einer einzigen Temperatur des schwarzen Körpers ausgeführt worden, indem vom roten zum violetten Ende fortschreitend, an jeder Stelle fünf Einstellungen gemacht wurden (Tab. 6).

Genauer wurden die Energiewerte für die Lampen A und C bestimmt. Jede von ihnen wurde mit dem schwarzen Körper bei zwei verschiedenen Temperaturen photometriert, und die Messungsreihen wurden hier ausserdem vom roten

zum violetten Spektralende hin und wieder zurück durchlaufen; dabei wurden an jeder Stelle jedesmal mehrere Einstellungen — im ganzen mindestens fünf — gemacht. Die auf dem Rückwege erhaltenen Werte stimmten mit den auf dem Hinwege gewonnenen innerhalb der Fehlergrenzen überein. Tabelle 7 a und b enthält die Energiemessungen an Lampe A, Tabelle 8 a und b die an Lampe C. Aus den beiden Messungsreihen wurde für jede der Lampen dann mit Hilfe der Gauss'schen Additionslogarithmen der Logarithmus des Mittelwertes von J_λ gebildet.

b. Helligkeitsmesssung und Bildung der Empfindlichkeiten.

Die Helligkeitsverteilung habe ich mit dem Flickerphotometer für mein eignes Auge an Lampe C bestimmt. Die Messungen sind wieder in Rechts- und Linksstellung so ausgeführt, dass zunächst bei gleich breiten Spalten die gleich hellen Farben im Spektrum durch Verschieben des Fernrohres aufgesucht wurden. Diese Messungen, die den Ausgangspunkt für alle folgenden bilden, sind hier besonders sorgfältig ausgeführt. Wie alle anderen wurden sie bei zwei verschiedenen Spaltbreiten gemacht, wobei jedesmal Mittelwerte aus zwanzig Einstellungen angegeben sind. Die Tabellen 9 a und b zeigen, dass die Justierung der Lampe gut war, da die gleich hellen Wellenlängen bei Rechts- und Linksstellung sich nur wenig unterscheiden.

Von der „Gleichheitsstellung" des Fernrohres ausgehend, gewinnt man durch die Anschlussmessungen die Helligkeitswerte an etwa neun Punkten des Spektrums. Aus diesen wurde für einen weiteren, zwischenliegenden Punkt der Helligkeitswert durch Interpolation berechnet. In gleicher Weise wie vorher lässt sich dann wieder an diesen neuen Punkt eine Reihe von Wellenlängen anschliessen, die zwischen die der ersten Reihe fallen. Auf diese Art wurden bei Rechts- und Linksstellung im ganzen je siebzehn Helligkeitswerte gefunden.

Alle diese Anschlussmessungen, bei denen das Fernrohr fest eingestellt und eine Spaltbreite bis zum Verschwinden des Flickerns variiert wurde, wurden bei zwei verschiedenen

Spaltbreiten mit je fünf Einstellungen ausgeführt. Sie sind in Tabelle 10 a und b wiedergegeben. In Tabelle 11 sind danach die logarithmischen Helligkeiten berechnet, die auf Tafel II in Kurve 1 und 2 als Funktion der Wellenlänge dargestellt sind. Aus den beiden Kurven wurden graphisch die Werte von log H_λ für diejenigen Wellenlängen entnommen, bei denen die Energiewerte bestimmt waren, und daraus die Logarithmen der zugehörigen mittleren Helligkeit gebildet (Tabelle 12, Kolonne 1), die schliesslich noch auf das Normalspektrum reduziert wurden.

Die Reduktionsfaktoren haben hier etwas andere Werte als in Tabelle 5. Infolge kleiner Reparaturen, die an dem Apparat im Laufe der Zeit mehrfach ausgeführt werden mussten, hatten sich nämlich die Dispersionskurven wiederholt etwas geändert und mussten neu bestimmt werden. Natürlich wurden sie vor und nach jeder Messungsreihe genau geprüft. Übrigens sieht man, dass der Einfluss der Verschiebung auf die Reduktionsfaktoren gering ist.

Tabelle 12 enthält im dritten Stabe die reduzierten logarithmischen Helligkeiten, die auf Tafel II in Kurve 3 dargestellt sind.

Zur Bildung der Empfindlichkeitswerte sind im vierten Stabe die Energiewerte der Lampe C eingetragen, wie sie sich aus Tabelle 8 a und b als Mittelwerte ergeben. Die Differenz log $H_{\lambda(r)}$ — log J_λ liefert an jeder Stelle den Logarithmus der Empfindlichkeit E_λ. Damit dieser an der Stelle grösster Empfindlichkeit gleich 2, die Empfindlichkeit selbst also gleich 100 wird, ist in Kolonne 5 zu den Werten von log J_λ überall noch 8,884 addiert, d. h. die Energien sind überall im gleichen Verhältnis vergrössert. Auf Tafel II sind diese Energiewerte durch Kurve 4 veranschaulicht.

Die Empfindlichkeitskurve ist nach der letzten Kolonne der Tabelle 12 ebenfalls auf Tafel II zu sehen. Ihr Maximum liegt nahe bei 550 μμ, und zwar eher nach 540 als nach 560 μμ hin, wie man aus der Tabelle erkennt.

Ähnlich konnten die Empfindlichkeitskurven für eine Anzahl anderer Personen gewonnen werden, deren Farben-

sinn sich bei der Prüfung mit den Stillingschen Tafeln als normal erwies. Den Damen und Herren des physikalischen Instituts, die mir dazu durch die Ausführung der Helligkeitsmessungen freundlich verholfen haben, möchte ich hier noch einmal für die Opfer an Zeit und Mühe danken, die sie mir gebracht haben.

Die Messungen konnten hier allerdings nicht mit derselben Ausführlichkeit angestellt werden, schon weil die zum Teil wenig geübten Beobachter zu schnell ermüdeten. Es wurde vielmehr immer nur die Reihe der acht bis neun direkt angeschlossenen Wellenlängen durchphotometriert, ohne die durch die Interpolation angeschlossenen. Ferner wurden die Messungen stets nur bei einer Spaltbreite und schliesslich nur in Linksstellung des Apparates ausgeführt. Obgleich die Justierung der Lampe A, die hierbei benutzt wurde, besonders gut geglückt war, liegt hierin gewiss ein Bedenken. Denn trotz grösster Vorsicht scheint die Lampe während dieser über mehrere Wochen verteilten Untersuchungen nicht genau in der anfänglichen Stellung geblieben zu sein. Es konnte sich dabei, da die Lampenstellung durch einen Zeiger markiert war, zwar nur um kaum kontrollierbare Verschiebungen handeln, die aber in der Nähe der kritischen Stellung auf die Symmetrie der Beleuchtung beider Spalte doch schon merklich störend wirkten, während sie bei doppelseitiger Messung ohne Einfluss geblieben wären.

In Tabelle 13 sind die Helligkeitsempfindlichkeiten der verschiedenen Beobachter nach der zeitlichen Reihenfolge ihrer Helligkeitsmessungen geordnet. Man erkennt, wie bei den späteren Reihen zweifellos das Maximum im Durchschnitt bei etwas kürzeren Wellen liegt, als bei den ersten. Das ist sicherlich nicht auf individuelle Verschiedenheiten allein zurückzuführen. Nach jeder der Reihen prüfte ich durch einige Einstellungen auch für mein Auge wieder die Fernrohrstellung gleicher Helligkeiten und fand sie dabei in der Tat fast jedesmal annähernd so, wie die betreffende Versuchsperson vor mir, d. h. gegenüber der ursprünglichen, bei der Justierung der Lampe gefundenen etwas nach dem Blau zu verschoben, wenn auch geringe tatsächliche Unterschiede öfters bestehen blieben.

Die auf Tafel III nach Tabelle 13 gezeichneten Empfindlichkeitskurven würden, wie man nach alledem annehmen muss, bei genaueren Messungen sich noch enger aneinander anschliessen, und ihre Maxima würden durchweg nach etwas längeren Wellen hin rücken, mindestens zwischen 540 und 550 μμ. Jedenfalls ist den ersten Reihen höheres Gewicht beizulegen, als den letzten.

Herr Dr. K. ist Japaner. Er gab vor der Untersuchung an, für violettes Licht besonders unempfindlich zu sein. Seine Empfindlichkeitskurve, die im violetten Spektralende tiefer als alle anderen verläuft, gibt das deutlich wieder.

Von den Empfindlichkeitskurven der früheren Beobachter hat die von Thürmel ihr Maximum bei 560 μμ, die von König bei 555 μμ und die von Langley bei 550 μμ. Diese Beobachter haben allerdings in der Gegend des Maximums nur in Abständen von 20 zu 20 μμ, Langley sogar nur von 50 zu 50 μμ gemessen. Das Maximum der Stillerschen Kurve scheint wenig unterhalb 560 μμ zu liegen. Die erwähnte Empfindlichkeitskurve von Ives ist als Mittel aus den Messungen von fünf Beobachtern bei grosser Helligkeitsstufe gewonnen worden und ergibt die grösste Empfindlichkeit bei 545 μμ.

Aus dem Vergleich der sämtlichen fünfzehn Kurven ergibt sich mit Sicherheit, dass das Maximum der Helligkeitsempfindlichkeit für die Zapfen des normalen Auges in der Nähe von 550 μμ liegt[8]). Individuelle Verschiedenheiten bleiben hierin und im ganzen Verlauf der Kurve bis zu einem gewissen Grade aber immer bestehen.

Für den pyrometrischen Gebrauch des Spektralflickerphotometers folgt hieraus, dass jeder Beobachter als Grundlage für die Temperaturmessung seine eigene Empfindlichkeitskurve vorher bestimmen muss.

---

[8]) Während der Drucklegung erhalte ich Kenntnis von einer Mitteilung von R. A. Houstoun (Phil. Mag. 25, p. 715, 1913) über zwei Empfindlichkeitskurven, die er bei verschiedenen Helligkeitsstufen als Mittel aus den spektralen Helligkeitskurven von 52 farbentüchtigen Beobachtern erhalten hat. Die Maxima beider Kurven liegen auffallend weit nach dem Blau hin. Diese von den meinigen abweichenden Ergebnisse bedürfen erst einer näheren Prüfung.

§ 2.

Die foveale Helligkeitsempfindlichkeit desselben Beobachters zu verschiedenen Zeiten.

Die nächste Frage, die sich im Anschluss daran erhebt, ist die, wie weit die Verteilung der Empfindlichkeitswerte im Spektrum für dasselbe Auge zeitlich konstant bleibt. Um darüber Aufschluss zu gewinnen, hat bereits Herr Thürmel[9]) zu verschiedenen Zeiten ein und dieselben Messungen vorgenommen und gefunden, dass sie innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmten. Ich selbst habe einen Teil der Helligkeitsmessungen für die Linksstellung zweimal, an verschiedenen Tagen, ausgeführt, nämlich die Vergleiche bei den engeren Spaltöffnungen, soweit sie direkt an die gleich hellen Wellenlängen angeschlossen sind. Die Energieverteilung konnte ausser acht gelassen werden, da beide Male dieselbe Lampe (C) benutzt wurde.

Die ersten Beobachtungen rühren vom 5. Juli her. Die zweiten, vom 8. Juli, sind bereits in Tabelle 10 b enthalten und für die Berechnung meiner Empfindlichkeitskurve mit benützt worden. In Tabelle 14 sind sie zum Vergleich nochmals angeführt.

Die Übereinstimmung der an beiden Tagen gefundenen Helligkeitsverhältnisse ist sehr gut. Nur in den drei mit * bezeichneten Fällen ist der Unterschied zwischen ihnen grösser als der mittlere Fehler des Mittels aus fünf Einstellungen an der betreffenden Stelle; doch bleibt er immer in den Grenzen der überhaupt vorkommenden Fehler einer solchen Reihe. Auch bei gelegentlichen sonstigen Prüfungen zeigte sich dasselbe Ergebnis.

Die hierdurch erwiesene zeitliche Unveränderlichkeit der Kurve für denselben Beobachter rechtfertigt es erst, dass zur Bildung meiner Empfindlichkeitskurve oben Helligkeitsmessungen verwendet wurden, die an verschiedenen Tagen gemacht waren, was ja wegen der langen Dauer dieser Beobachtungen unvermeidlich blieb. Sie ist aber vor allem die notwendigste Vorbedingung für die praktische Verwendbarkeit des neuen optischen Pyrometers.

---

[9]) E. Thürmel, Dissertation S. 37. Breslau 1910.

§ 3.

Abhängigkeit der pyrometrischen Genauigkeit von den photometrierten Wellenlängen-Paaren.

Die bisherigen Untersuchungen erstreckten sich auf die Genauigkeit, mit der das Verhältnis $\frac{E_1}{E_2}$ der Helligkeitsempfindlichkeiten für die beiden photometrierten Wellenlängen gefunden werden kann. Das Energieverhältnis $\frac{J_1}{J_2} = \frac{H_1}{H_2}\frac{E_2}{E_1}$ der Farben, und damit die Sicherheit der Temperaturbestimmung durch das Spektralflickerphotometer, ist aber ausserdem noch von zwei weiteren Umständen abhängig:

1. Diese Sicherheit wird um so grösser sein, je genauer man das Helligkeitsverhältnis $\frac{H_1}{H_2}$ der beiden ausgeblendeten Spektralgebiete messen kann.
2. Bei gleicher Genauigkeit des Photometrierens für verschiedene Farbenpaare wird die Temperaturbestimmung um so genauer ausfallen, je weiter die beiden verglichenen Farben im Spektrum von einander abstehen. Denn da bei Änderungen der Temperatur die Energie der kurzen Wellen sich stärker ändert, als die der langen, so bewirkt die gleiche Temperaturänderung für ein paar weit auseinanderliegender Farben eine grössere Änderung des Energie- und damit des Helligkeitsverhältnisses, als für nahe benachbarte Farben. Beim Vergleich zweier weit entfernter Farben werden demnach schon verhältnismässig kleine Temperaturschwankungen bemerkbar werden.

Es handelt sich also darum, dasjenige Farbenpaar aufzufinden, bei dem beide Umstände möglichst günstig zusammentreffen.

a. Flickergenauigkeit bei verschiedenem spektralem Abstand der verglichenen Farben.

Zu diesem Zwecke wurden bei verschiedenen Abständen der beiden vorderen Spalte S_I und S_{II} des Apparates

(s. Fig. 2) zahlreiche Helligkeitsmessungen in allen Spektralgegenden ausgeführt und jedesmal die zugehörigen Genauigkeiten berechnet. Für 2 mm Spaltabstand lagen schon die Werte von Tabelle 10 a und b vor. Es wurde trotzdem auch hier noch eine Anzahl von Messungen ausgeführt. In Tabelle 15 sind die Ergebnisse für jeden der sechs benutzten Spaltabstände nach den Wellenlängen geordnet. Mit λ_1 ist dabei immer die längerwellige, mit λ_2 die kürzerwellige der verglichenen Farben bezeichnet.

Für jedes Wellenlängenpaar wurden mindestens zwei Reihen von je fünf Einstellungen gewonnen, die eine bei engeren Spalten (obere Zeilen der Tabelle), die andere bei weiteren (untere Zeilen). Es ist stets erstens der mittlere Fehler des Mittels aus diesen fünf Beobachtungen und zweitens der grösste vorkommende Fehler einer einzelnen Einstellung, beides in Prozenten des Helligkeitsverhältnisses der beiden Farben, in der Tabelle angegeben. Wie man sieht, ist eine wesentliche Änderung in der Genauigkeit des Photometrierens beim Variieren des Spaltabstandes von 2 bis 12 mm nicht vorhanden. Die Messungen bei 4 mm sind wohl durchschnittlich etwas schlechter, als die bei 2 mm. Dagegen sind bei 6 mm die Fehler wieder kleiner, und auch bei 10 und 12 mm Abstand liegen die mittleren Fehler noch zwischen 1 und 4 %. Die Schwankungen sind daher scheinbar nur darauf zurückzuführen, dass an manchen Tagen besser beobachtet wurde, als an anderen. Durchweg ist im Violett die Unsicherheit am grössten, weil hier die durch die kurzwelligen Strahlen im Auge erregte Fluoreszens störend wirkt. An den Enden des Spektrums ist ausserdem wegen der hier herrschenden geringen Beleuchtungsstärke des Feldes die Einstellung schwierig. Auch dies macht sich namentlich am violetten Ende geltend, da im Rot die Messungen nicht so weit nach dem Ende des Spektrums hin erstreckt wurden. Mit Ausnahme dieser Spektralgebiete ist aber das Helligkeitsverhältnis $\frac{H_1}{H_2}$ für alle Farbenpaare mit ziemlich gleicher Genauigkeit messbar.

b. Einfluss der Temperaturänderung auf das Helligkeitsverhältnis verschiedener Farbenpaare.

In viel höherem Grade unterscheiden sich die Änderungen, die das Helligkeitsverhältnis der beiden ausgeblendeten Farben durch eine und dieselbe Temperaturänderung bei verschiedenen Spaltabständen erfährt. Man kann dies unter der Voraussetzung, dass die Lichtquelle wie ein schwarzer Körper strahlt, leicht berechnen.

Für das sichtbare Gebiet darf die Wiensche Spektralgleichung benutzt werden. Danach ist die Strahlungsenergie der Wellenlänge λ bei T^0 absolut für den schwarzen Körper

$$S_\lambda = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{-c_2}{\lambda T}},$$

also das Energieverhältnis zweier Farben λ_1 und λ_2

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot e^{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}.$$

Nun ist $\frac{H_1}{H_2} \infty \frac{S_1}{S_2}$, also $\frac{\frac{d\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{dT}}{\frac{H_1}{H_2}} = \frac{\frac{d\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{dT}}{\frac{S_1}{S_2}}$.

$$\frac{d\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{dT} = -\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot e^{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)} \cdot \frac{c_2}{T^2}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = -\frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{c_2}{T^2} \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}$$

Folglich $$\frac{\frac{d\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{dT}}{\frac{H_1}{H_2}} = -\frac{c_2}{T^2} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}.$$

Die prozentische Änderung des Helligkeitsverhältnisses zweier Farben bei Änderung der Temperatur T der Lichtquelle um dT ist also dem Ausdruck $\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}$ proportional.

Setzt man darein für λ_1 und λ_2 einmal zwei Werte ein, die dem engsten Spaltabstande von 2 mm entsprechen, etwa $\lambda_1 = 0{,}59\ \mu$ und $\lambda_2 = 0{,}55\ \mu$, so wird

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} = \frac{0{,}04}{0{,}59 \cdot 0{,}55} = 0{,}123.$$

Setzt man $\lambda_1 = 0{,}66\ \mu$; $\lambda_2 = 0{,}50\ \mu$, entsprechend etwa dem maximalen benutzten Spaltabstand von 12 mm, so ist

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} = \frac{0{,}16}{0{,}66 \cdot 0{,}50} = 0{,}485.$$

Die Änderung ist demnach im letzten Falle rund vier Mal so gross wie im ersten, d. h., da die Genauigkeit des Photometrierens in beiden Fällen annähernd gleich gross ist, man kann durch den Vergleich der weit auseinander liegenden Farben viermal kleinere Temperaturschwankungen nachweisen, als durch den Vergleich der nahe benachbarten Farben.

Für gegebene Werte von T lässt sich die Genauigkeit der Temperaturmessung direkt angeben. Nimmt man an, dass das Helligkeitsverhältnis $\frac{H_1}{H_2}$ auf 2 % genau bestimmt ist, so ist

$$\frac{d\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{\frac{H_1}{H_2}} = \frac{d\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{\frac{S_1}{S_2}} = -c_2 \cdot \frac{dT}{T^2} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} = 0{,}02,$$

$$\text{also } |dT| = \frac{0{,}02 \cdot T^2}{c_2 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}}.$$

Setzt man für c_2 den Wert 14 600, so ist bei Benutzung des engeren Farbenpaares, $\lambda_1 = 0{,}59$ und $\lambda_2 = 0{,}55\ \mu$, der Fehler in der Temperaturbestimmung

bei $T = 1000^0$ abs. $dT = 11{,}1^0$ d. h. 1,1 %,
bei $T = 2000^0$ abs. $dT = 44{,}4^0$ d. h. 2,2 %.

Bei Benutzung der Wellenlängen $\lambda_1 = 0{,}66$ und $\lambda_2 = 0{,}50\ \mu$ ist

bei $T = 1000^0$ abs. $dT = 2{,}8^0$ d. h. 0,3 %,
bei $T = 2000^0$ abs. $dT = 11{,}3^0$ d. h. 0.6 %.

Für den pyrometrischen Gebrauch des Spektralflickerphotometers wird es sich deshalb empfehlen, zwei Wellen-

längen von einem spektralen Abstand, der ungefähr dem Spaltabstand von 12 mm entspricht, ein für alle Mal fest einzustellen, und ebenso die Breite eines der beiden Spalte, am besten desjenigen, der die dunklere Farbe liefert. Durch einige Einstellungen des anderen (empfindlicheren) Spaltes findet man dann das Helligkeitsverhältnis der beiden Farben mit einer Genauigkeit bis auf wenige Prozent und mit Hilfe der Empfindlichkeitskurve ihr Energieverhältnis, aus dem sich die schwarze Temperatur der Lichtquelle berechnen lässt.

Noch einfacher kann die Skala, auf der man die variable Spaltbreite abliest, direkt in Temperaturen geeicht sein.

Um den Apparat auch für Beobachter, deren Empfindlichkeitskurven man n i c h t kennt, einigermassen brauchbar zu machen, wäre es zweckmässig, ihm noch eine Ersatzblende beizugeben, mittels deren ein Paar n a h e b e n a c h b a r t e r Farben aus einem geeigneten Teile des Spektrums ausgeblendet werden könnte. Tafel III zeigt, dass dies etwa in der Gegend von 600 bis 620, oder auch zwischen 500 und 530 μμ geschehen müsste, weil hier die Empfindlichkeitskurven alle ziemlich parallel laufen, die Individualität des Beobachters also am wenigsten zum Ausdruck kommt.

III. Teil.

Rein physiologische Messungen.

§ 1.

Helligkeitsempfindlichkeit total farbenblinder Augen.

Durch die gütige Vermittlung Herrn Geheimrat Uhthoffs konnten mir von der hiesigen Universitäts-Augenklinik zwei Fälle von angeborener totaler Farbenblindheit zur Untersuchung am Spektralflickerphotometer überwiesen werden. Sie zeigten die typischen Eigentümlichkeiten dieser Kranken, insbesondere die geringe Sehschärfe und die Scheu vor grossen Helligkeiten, gegen die sie sich durch dunkle Brillen schützten.

Beide Patienten waren imstande, die erforderlichen Einstellungen mit ziemlicher Schärfe auszuführen. Für den ersten von ihnen, Bergarbeiter M, diente als Lichtquelle die Lampe A, die vorher genau justiert war, so dass beide Spalte gleich hell beleuchtet waren. Die Verteilung der Helligkeitswerte im Spektrum konnte hier zuerst bei 2, darauf bei 4 mm Abstand der beiden Spalte, jedes Mal in Rechts- und Linksstellung, gemessen werden. Man erhielt also im ganzen vier vollständige Helligkeitskurven, von denen allerdings die bei 4 mm Abstand gemessenen nur durch fünf bis sechs Punkte bestimmt werden konnten.

Für jedes Wellenlängenpaar wurden mindestens zehn Einstellungen gemacht. Auch wurde die Vorsicht gebraucht, während jeder Einstellungsreihe das Fernrohr bezw. die Spalttrommel ohne Wissen des Beobachters ein oder mehrere Male stark zu verstellen, um die Mitwirkung des Gedächtnisses auszuschalten. Das Flickern wurde dann sogleich wieder deutlich wahrgenommen, und zu seiner Beseitigung wurde annähernd dieselbe Einstellung getroffen, wie vorher. Die Fehler innerhalb jeder Beobachtungsreihe mögen hierdurch etwas vergrössert worden sein. Dem Mittelwerte aber wird man dafür um so grösseres Gewicht bei-

legen können. Der mittlere Fehler erreicht in einem Falle 10 %, lag indessen meist viel tiefer, zwischen drei und sechs Prozent.

Es mag genügen, in Tabelle 16 die logarithmischen Helligkeitsverteilungen anzuführen, die sich in den vier Fällen ergaben. Auf Tafel IV sind danach die vier unreduzierten Kurven für log H_λ gezeichnet (Kurve 1—4).

In Tabelle 17 sind in Kolonne 1 die Logarithmen der aus allen vier Kurven gebildeten mittleren Helligkeiten enthalten und in Kolonne 2 und 3 auf das Normalspektrum reduziert. Mit Hilfe der Energieverteilung für Lampe A, die aus Tabelle 7 a und b durch Mittelwertbildung gewonnen ist, ist daraus in bekannter Weise die Empfindlichkeit gebildet.

Kurve 5 auf Tafel IV stellt die reduzierte Helligkeitsverteilung, Kurve 6 die Energieverteilung der Lampe A nach Kolonne 5 dar. Letztere ist übrigens — bis auf die Parallelverschiebung — auch die den Kurven von Tafel III zugrunde liegende Energiekurve.

Die Empfindlichkeit des Totalfarbenblinden M ist auf Tafel IV ebenfalls graphisch dargestellt.

Für den zweiten Totalfarbenblinden, Korbmacher W, wurden die Helligkeitsmessungen nur bei 2 mm Spaltabstand in Rechtsstellung ausgeführt. Die dadurch bewirkte Asymmetrie erwies sich durch Parallelmessungen, die ich selbst unter den gleichen Bedingungen vornahm und mit meinen früheren Messungen verglich, als so gering, dass sie nicht berücksichtigt zu werden braucht. Es wurde hierbei die Lampe B benützt. Die Genauigkeit der Beobachtungen war etwa dieselbe, wie bei dem ersten Totalfarbenblinden. Auch hier wurden an jeder Stelle mindestens zehn, meist mehr Einstellungen gemacht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 und 19 und graphisch auf Tafel IV wiedergegeben.

Man sieht auf den ersten Blick, dass die Helligkeitsempfindlichkeiten der beiden Totalfarbenblinden von der der normalen Netzhautmitte prinzipiell verschieden sind, während sie unter einander eine fast vollständige Übereinstimmung zeigen. Die Netzhautelemente des total farbenblinden Auges sind nicht, wie die Zapfen des normalen

Auges, für die Energie von der Wellenlänge 550 μμ am empfindlichsten, sondern für die von etwa 515 μμ. Die Kurven der Totalfarbenblinden fallen ausserdem steiler ab, als die des normalen Auges, so dass sie eine viel kleinere Fläche umschliessen, als diese. Namentlich ist die starke Verkürzung des roten Spektralendes für die Monochromaten aus den Kurven deutlich zu erkennen. Bekanntlich werden auch die tief roten Farbentöne von ihnen als „schwarz" bezeichnet und mit Schwarz verwechselt. Eine geringe Verkürzung des Spektrums am kurzwelligen Ende wird aus Tafel IV ebenfalls wahrscheinlich gemacht, da die verlängerten Empfindlichkeitskurven des total farbenblinden und des normalen Auges, wie es scheint, unterhalb 440 μμ nochmals zum Schnitt kommen würden. Sie würde aber jedenfalls hier nicht den Betrag wie im Roten erreichen.

Beobachtungen über die spektralen Helligkeitskurven total farbenblinder Augen sind in der Literatur schon mehrfach beschrieben. Sie sind zuerst von Donders[1]), später von König und Dieterici[2]), von Hering[3]), v. Kries[4]), Nagel und May[5]) angestellt worden. Der Vergleich meiner Ergebnisse mit den Befunden bei diesen früher untersuchten Fällen totaler Farbenblindheit ist dadurch erschwert, dass die erwähnten Forscher nur die Helligkeitsverteilung in dem etwas unbestimmten „prismatischen Spektrum", noch dazu ganz verschiedener Lichtquellen, gemessen haben, ohne die Reduktion auf das Normalspektrum und auf konstante Energieverteilung auszuführen.

---

[1]) F. C. Donders, „Onderzoek, gedaan in het Physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool" 3 de Reeks. D VII Bl. 95. 1882.

[2]) A. Koenig u. C. Dieterici, „Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum". Sitzungsber. d. Berl. Akad. 1886, S. 805. Ztschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. 4, S. 241. 1893. Königs ges. Abh. zur physiol. Optik, Leipzig 1903, S. 60.

[3]) E. Hering, „Untersuchung eines total Farbenblinden", Pflügers Archiv f. d. ges. Physiologie 49, S. 563. 1891.

[4]) J. v. Kries, „Über Farbensysteme", Ztschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 13, S. 241. 1897.

[5]) Bruno May, „Ein Fall totaler Farbenblindheit", Ztschr. f. Physiol. etc. 42, 2. Abt., S. 69. 1908.

Nimmt man indessen an, dass alle diese Dispersionsspektren untereinander und mit dem hier benützten einigermassen übereinstimmen, so sind die beschriebenen Resultate mit denen früherer Beobachter durchaus im Einklang. Denn diese fanden die Lage des Helligkeitsmaximums für das total farbenblinde Auge bei etwa 540 μμ, ganz so, wie es die unreduzierten logarithmischen Reihen in Tabelle 17 und 19 zeigen.

Die vorstehenden Helligkeitsmessungen liefern also kein grundsätzlich neues Ergebnis; sie sind vielleicht von Interesse durch die bei ihnen erreichte Genauigkeit, die die Lage des Maximums selbst für diese ganz geübten Beobachter bis auf wenige μμ mit Sicherheit zu bestimmen gestattet.

Dagegen ist hier zum ersten Male die Helligkeitsempfindlichkeit total farbenblinder Augen bestimmt und damit vielleicht ein weiterer Schritt zum Verständnis der Wirkungsweise des Auges getan worden. Denn nicht darauf kommt es an, zu wissen, welche Stelle irgend eines Spektrums dem Auge am hellsten erscheint, sondern darauf, welche Stelle in einem Spektrum von überall gleicher Energie, wenn es ein solches gäbe, dem Auge die grösste Helligkeit darbieten würde. Nur dadurch gewinnt man die rein physiologischen Helligkeitswerte der Farben, ohne den entstellenden Einfluss physikalischer Faktoren.

§ 2.

Helligkeitsempfindlichkeit des normalen Auges bei verschiedenen Graden peripherer Beobachtung.

Während der Untersuchung der total farbenblinden Augen wurden mehrfach zum Vergleich Einstellungen für das normale Auge gemacht, bei denen sich die grosse Verschiedenheit zwischen beiden auf das deutlichste zeigte. Am auffälligsten war dies beim Aufsuchen der gleich hellen Farben mittels der Fernrohrverschiebung. Bei der von den Farbenblinden übereinstimmend als Ruhestellung bezeichneten Fernrohrstellung war für das normale Auge ein lebhaftes, beinahe schlagendes Flickern zu bemerken. Um-

gekehrt wurde die Einstellung des normalen Auges auf Ruhe von den Farbenblinden nicht anerkannt.

Blickte aber der normale Beobachter nicht direkt in das Fernrohrokular, sondern so, dass das Bild des Photometerfeldes auf die Randpartien der Netzhaut fiel, so zeigte sich eine deutliche Annäherung seiner Einstellungen an die des Totalfarbenblinden.

In Tabelle 20 sind die relativen logarithmischen Helligkeitswerte für einige Wellenlängen angeführt, so wie sie sich für das normale Auge bei direktem und indirektem Sehen aus diesen ersten Messungen ergaben. Herr Geheimrat Lummer hatte die grosse Freundlichkeit, sich an dieser Untersuchung als ein zweiter normal farbentüchtiger Beobachter zu beteiligen. Es sind stets Mittelwerte aus mehreren, meist zehn Beobachtungen zur Berechnung benützt. Die Einstellungen wurden abwechselnd mit denen des Totalfarbenblinden W. ausgeführt. Zum Vergleich sind die von diesem bei direkter Beobachtung erhaltenen Werte von log H_λ aus seiner unreduzierten Kurve (7 auf Tafel IV) graphisch interpoliert und in Kolonne 3 der Tabelle 20 mit angeführt. Bei $\lambda = 538{,}5$ $\mu\mu$ wurde willkürlich auch in den vier übrigen Kolonnen für log H_λ derselbe Wert festgesetzt, und alle anderen Helligkeitswerte der betreffenden Reihe wurden darauf bezogen. Man sieht, dass die direkt gefundene Helligkeitsverteilung für die beiden normalen Beobachter sehr ähnlich und von der des Totalfarbenblinden wiederum deutlich verschieden ist. Dagegen stimmen mit dieser fast genau die beiden von den normalen Augen peripher beobachteten Reihen überein.

Wäre die Helligkeit des photometrischen Feldes sehr gering — unter der fovealen Reizschwelle — und das farbentüchtige Auge vorher längere Zeit hindurch sorgfältig dunkeladaptiert gewesen, so läge hierin nichts Auffallendes. Man hätte die peripher beobachteten Helligkeitswerte dann als die schon mehrfach bestimmten „Dämmerungswerte" des normalen Auges anzusehen, die auf die alleinige Wirksamkeit des Stäbchenapparates bei schwachen Helligkeiten und Dunkeladaptation zurückgeführt werden, und deren Übereinstimmung auf allen Stellen der Netzhaut mit den direkt

beobachteten Helligkeitswerten für das total farbenblinde Auge man seit langem kennt[6]). Hiervon kann im vorliegenden Falle aber nicht die Rede sein. Gerade die Grundbedingung des Dämmerungssehens, wie man es bisher definierte, die Bedingung der schwachen Feldhelligkeit, war keineswegs erfüllt. Im Gegenteil, wurden die indirekten Einstellungen an demselben Felde gewonnen, das bei direkter Betrachtung von den verschiedenen Spektralfarben mit leuchtender Helligkeit ausgefüllt wurde. Auch beim peripheren Sehen erschien das Feld sehr hell, aber farblos und in dem eigentümlichen silbernen Glanz der Stäbchenempfindung.

Woher kommt das? Und wie erklärt sich unter diesen Umständen die Übereinstimmung zwischen den peripheren Beobachtungen des normalen und den direkten Beobachtungen des total farbenblinden Auges?

Beide Tatsachen lassen vermuten, dass man es trotz der grossen Helligkeit des photometrischen Feldes auch im ersten Falle mit reinem Stäbchensehen zu tun hatte. Um sie verständlich zu machen, muss man den Adaptationszustand des Auges berücksichtigen. Ihm wurde freilich nicht die Aufmerksamkeit zugewandt, die er nach den Ergebnissen zahlreicher früherer Untersuchungen auf diesem Gebiete verdient; denn leider war mir zur Zeit dieser Messungen ein gosser Teil jener Arbeiten noch nicht bekannt. Der Beobachter ging also ohne besondere Vorbereitung an die

---

[6]) Vergl. F. Hillebrandt, „Über die spezifische Helligkeit der Farben", mit Vorbemerkung von E. Hering, Sitz. Ber. K. Akad. Wien 98 Abt. III S. 70. 1889. — A. König, „Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität", Festschr. zu Helmholtz' 70. Geburtstag S. 309. 1891, aus den Beiträgen zur Psychol. und Physiol. d. Sinnesorg. und Ges. Abh. zur physiol. Optik S. 184, Leipzig 1903. — J. v. Kries u. W. Nagel, „Über den Einfluss von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten", Ztschr. f. Psych. u. Physiol. d. S. 12, S, 1. 1896. — J. v. Kries, „Über Farbensysteme", Ztschr. f. Psych. etc. 13, S. 241. 1897. — M. Schaternikoff, „Neue Bestimmungen über die Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gas- und Sonnenlichtes", Ztschr. für Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 29, S. 255. 1902 und Abh. zur Physiol. der Gesichtsempf., herausgeg. von v. Kries, Heft 2. 1902 — Bruno May, l. c.

Untersuchung. Doch war das Fenster des Beobachtungszimmers lichtdicht verschlossen, so dass in dem Raume nur die schwache von der Mattscheibe ausgehende diffuse Strahlung herrschte, gegen die der Beobachter während der eigentlichen Einstellungen noch durch Schirme geschützt war[7]). Nimmt man hinzu, dass die Messungen wohl immer erst nach einigen Minuten solchen Dunkelaufenthaltes begonnen wurden, so folgt, dass bei ihnen eine wenn auch nicht vollständige, so doch ganz ausgesprochene Dunkeladaptation vorlag. Alle diese Bedingungen waren übrigens ganz dieselben, wie bei den direkten Beobachtungen.

War aber für die Wirkungsweise der stäbchenfreien fovea centralis der Adaptationszustand ohne Einfluss, so konnte man für die extrafovealen Teile der Netzhaut nicht dasselbe erwarten. Hier finden sich, wie die mikroskopische Anatomie der Netzhaut lehrt, neben den farbenempfindlichen Zapfen die total farbenblinden Stäbchen, die nach dem Rande hin an Zahl ständig zunehmen, während gleichzeitig die Zapfen immer seltener werden und von bestimmten Graden der Exzentrizität an überhaupt nicht mehr vorkommen. Bei grossen Helligkeiten sind auch in den Gebieten, wo beide Arten von Netzhautelementen gemischt auftreten, fast ausschliesslich die Zapfen wirksam. Vermindert man aber die Helligkeit, so steigert sich die Empfindlichkeit der Stäbchen in so viel höherem Masse, als die der Zapfen, dass sie mit letzteren in Wettstreit zu treten beginnen, um sie schliesslich bei genügender Dunkeladaptation weit zu übertreffen. Bei plötzlichem Übergang aus dem Dunkelzimmer in einen hellen Raum sinken fast momentan die Stäbchen wieder zu ihrer früheren Bedeutungslosigkeit zurück.

Anders ist es aber, wenn man dem dunkeladaptierten Auge in dem sonst dunklen Gesichtsfelde eine nicht allzu grosse leuchtende Fläche darbietet, wie es z. B. in dem bekannten Vorlesungversuch geschieht, bei dem den Zuhörern in einem verdunkelten Raume in einiger Entfernung

---

[7]) Natürlich war der Apparat selbst vollständig lichtdicht eingebaut.

eine bei direkter Beobachtung rot leuchtende Glühlampe vorgeführt wird. Sieht man nach kurzem Dunkelaufenthalt an der Lampe schräg vorbei, so schlägt ihre Farbe augenblicklich in das glänzende Stäbchenweiss um. Der Versuch gelingt bis zu beträchtlichen Helligkeitsgraden der Lampe, bei denen jedenfalls die Reizschwelle für die Zapfen überschritten ist, wie die Wahrnehmung der Rotglut beweist[8]).

Ein ähnlicher Fall liegt bei den oben geschilderten indirekten Beobachtungen vor. Wie bereits erwähnt, erschien dabei das Photometerfeld im Okular als helle Fläche von nur 2° Gesichtswinkel auf dunklem Grunde. Nimmt man an, wie es Herr Geheimrat Lummer tut, dass die Funktionsweise der Netzhautperipherie bei einer derartigen Anordnung wesentlich durch den Adaptationszustand bestimmt ist, von der Helligkeit des kleinen Feldes aber nicht abhängt, so wird ohne weiteres klar, dass man dabei Stäbchenwerte erhalten musste.

Das Überwiegen der Stäbchen muss um so deutlicher hervortreten, je mehr die beobachtenden Netzhautstellen nach dem Rande hin liegen; denn um so mehr sind die Stäbchen auch zahlenmässig den Zapfen überlegen. Man kann daher die Frage experimentell prüfen, indem man die Helligkeits-, oder besser die Empfindlichkeitsverteilung im Spektrum für das normale Auge bei verschiedenen Graden des peripheren Sehens misst, unter sonst gleichen Bedingungen, die nur von denen des „Dämmerungssehens" durch die weit über der fovealen Schwelle liegende Helligkeit des Photometerfeldes verschieden sein müssen. Dabei ist darauf zu achten, dass die untersuchten Netzhautpartien noch innerhalb des Gebietes liegen, wo Stäbchen und Zapfen gemischt vorkommen. Wie man weiss, verlaufen die Grenzen für die Möglichkeit der Farbenwahrnehmung in der nasalen Gesichtsfeldhälfte des normalen Auges für Grün etwas ausserhalb 30°, für Rot etwa bei 40°, für Blau bei 50° Exzentrizität. Bei Helladaptation müsste man also bis zu 30° Exzentrizität hin, wie beim direkten Sehen, noch alle Farben wahrnehmen und jedenfalls die Zapfenkurve der

[8]) Vergl. O. Lummer, „Über Grauglut und Rotglut", Wied. Ann. 62, S. 14. Verh. d. Phys. Ges. 16, S. 121. 1897.

Helligkeitsempfindlichkeit erhalten. Dagegen müssen sich, wenn die erwähnte, von O. Lummer aufgestellte Annahme richtig ist, bei denselben Feldhelligkeiten, aber dunkeladaptiertem Auge, die gewonnenen Kurven mit zunehmender Abweichung von der direkten Sehlinie mehr und mehr nach den kurzen Wellen hin verschieben und im äussersten Falle mit denen der beiden Totalfarbenblinden zusammenfallen, nämlich dann, wenn die wirksamen Netzhautstellen so weit nach dem Rande zu liegen, dass für die Lichtwahrnehmung nur noch die auf ihnen befindlichen Stäbchen in Betracht kommen.

Auf diesem Wege habe ich es versucht, über die Richtigkeit der Lummerschen Hypothese eine Entscheidung zu gewinnen, indem ich die Helligkeitsempfindlichkeit meines Auges für die spektralen Lichter bei peripherer Beobachtung zuerst von 20, darauf von 30° Abweichung von der direkten Sehlinie in der alten Weise am Flickerphotometer bestimmte.

Der Apparat, der in allem ganz wie früher angeordnet war, musste dazu noch durch eine Vorrichtung vervollständigt werden, die eine genaue Bestimmung der Blickrichtung ermöglichte. Zu diesem Zwecke wurde über das Beobachtungsfernrohr ein geschwärzter Kasten von der aus Figur 3 ersichtlichen Form gestülpt, dessen vordere, dem Beobachter zugekehrte Seite offen war, und in dessen Hinterwand der mittlere Streifen, der eine kleine Kreisöffnung M zeigte, sich horizontal verschieben liess. Die Öffnung, die mit einer Mattglasscheibe bedeckt und von hinten schwach beleuchtet war, diente als Fixiermarke, auf die das Auge gerichtet war, während zugleich mit dem Randteile der Netzhaut die Einstellung auf Verschwinden des Flickerns gemacht wurde.

Die Lichtquelle bildete Lampe A. Sie musste, um beide Spalte des Photometers gleichmässig zu beleuchten, zuerst — wie immer — bei d i r e k t e r Beobachtung genau justiert werden. In der endgültigen Aufstellung ergaben sich als gleich hell die Wellenlängen

608,4 μμ und 566,6 μμ bei Rechtsstellung,
608,9 μμ und 566,2 μμ bei Linksstellung.

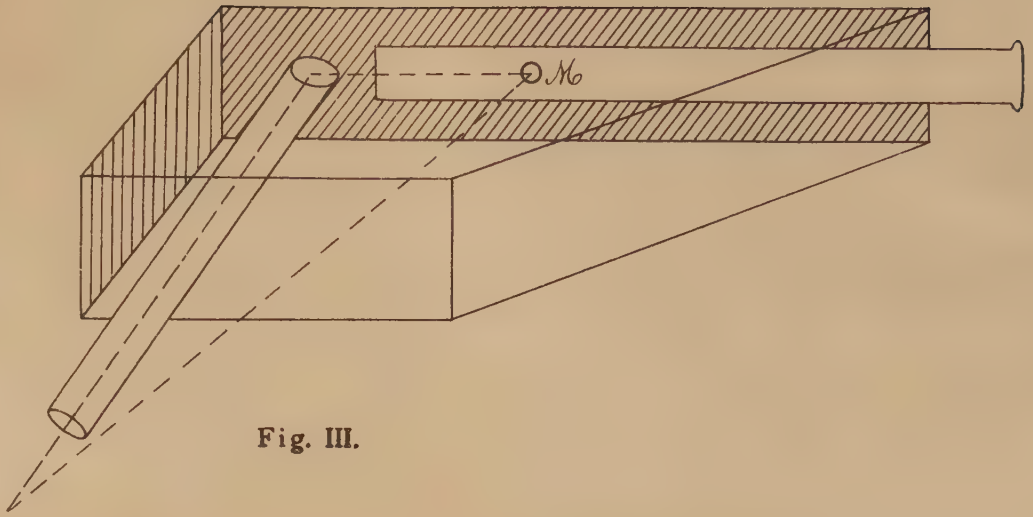


Fig. III.

Die Symmetrie ist danach so gut wie vollständig, so dass es genügt, die indirekten Messungen in einseitiger Apparatstellung auszuführen, zumal die am Schlusse vorgenommene Kontrolle zeigte, dass Lampe und Apparat ihre gegenseitige Stellung nicht verändert hatten. Es wurde durchweg die Linksstellung beibehalten. Demgemäss mussten auch für die Reduktionsfaktoren im Folgenden diejenigen Werte genommen werden, die sich aus den für die Linksstellung gültigen Dispersionskurven allein ergeben. Das Photometerfeld lag im nasalen Gesichtsfelde.

Alle Messungen wurden bei zwei verschiedenen Spaltbreiten ausgeführt. Die Ergebnisse sind für 20 ° Exzentrizität in den Tabellen 21 bis 23, für 30 ° Exzentrizität in Tabelle 25 bis 27 vollständig wiedergegeben, aus denen auch die dabei erreichte Genauigkeit ersichtlich ist. Letztere ist sehr viel geringer, als bei den direkten Einstellungen, wie nicht anders zu erwarten ist, wenn man die grossen Schwierigkeiten solcher indirekten Flickermessungen bedenkt. Mit Rücksicht darauf enthält jede Einstellungsreihe hier zehn Beobachtungen, anstatt wie früher nur fünf. Die flimmerfreie Stelle war jedesmal deutlich wahrnehmbar, während beiderseits von ihr das Flimmern wieder einsetzte.

In Tabelle 24 und 28 sind die Empfindlichkeiten für 20 und 30 ° Abstand von der Netzhautmitte gegeben und auf Tafel II gezeichnet. Beide Kurven zeigen gegenüber der fovealen in Tabelle 12 eine starke Verschiebung nach dem kurzwelligen Spektralgebiet hin, und zwar ist schon bei 20 ° annähernd die Kurve der Totalfarbenblinden erreicht, wie aus dem Vergleich mit Tabelle 17 und noch besser aus Tafel II hervorgeht. Die Kurve für 30 ° Exzentrizität ist demgegenüber nur noch wenig, aber doch deutlich nach dem Blau hin verschoben, im Sinne einer noch besseren Annäherung an die der Totalfarbenblinden.

Um festzustellen, ob bei weiterer Vergrösserung des Winkels zwischen der Fixierrichtung und der Fernrohrachse auch die Verschiebung der Kurve noch anhalten würde, wurden noch Messungen bei 40 ° Exzentrizität ausgeführt, die sich aber darauf beschränkten, die Stellung gleicher Helligkeiten für das Fernrohr zu bestimmen (Tabelle 29).

Eine vollständige Kurve konnte wegen der gesteigerten Schwierigkeit der Messungen nicht mehr gewonnen werden. Die gleich hellen Farben sind nicht mehr nach dem Blau zu verschoben, sondern fallen mit den bei 30° erhaltenen zusammen. Nach der Lummerschen Hypothese ist das selbstverständlich; denn man kann danach bei noch so schrägem Sehen höchstens die Kurve der Totalfarbenblinden, die „Stäbchenkurve", erhalten, nie eine solche, die noch weiter nach dem kurzwelligen Ende des Spektrums hin verschoben liegt. Diese Endstellung scheint schon bei indirektem Sehen unter ungefähr 30° erreicht zu sein. Schon die um 30° vom Zentrum entfernten Stellen der Netzhaut sind danach bei Dunkeladaptation für ein kleines helles Feld praktisch total farbenblind, d. h. die Stäbchen überwiegen dort die Zapfen bereits vollständig.

Um den allmählichen Übergang von der Zapfenkurve zur Stäbchenkurve noch deutlicher zu erweisen, wäre es wünschenswert, dass auch noch unter einigen kleineren Winkeln, etwa 10° und 15°, die Empfindlichkeitskurven unter den gleichen Bedingungen aufgenommen würden, wie es für 0°, 20° und 30° oben geschehen ist. Jedenfalls scheint jedoch schon hierdurch die Annahme bestätigt zu sein, dass die totale Farbenblindheit der Peripherie für ein kleines Feld bei Dunkeladaptation unter allen Umständen als ein reines Stäbchensehen aufzufassen ist, unabhängig von der Helligkeit der verwendeten Lichter.

Die gewonnenen Resultate bilden in gewissem Sinne eine Ergänzung zu den Beobachtungsergebnissen des Herrn v. Kries und seiner Schüler[9]). Herr v. Kries nämlich (und ebenso Polimanti u. a.) findet einen Unterschied in der Wirkungsweise der normalen Netzhautperipherie einmal bei Dunkeladaptation und sehr schwacher Helligkeit, sodann bei Helladaptation und grosser Helligkeit des Feldes. Er sagt

---

[9]) J. v. Kries: „Über die Farbenblindheit der Netzhautperipherie", Ztschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 15, S. 247. 1897 u. Zentralbl. f. Physiol. 10, S. 745. 1897. Nagels Handb. d. Physiol. III, S. 259/260. O. Polimanti, l. c.

darüber[10]): „Bei der Schwierigkeit, auf die es stösst, den Einfluss beider Momente, Lichtstärke und Adaptation, von einander zu sondern, kann es jedenfalls einmal als die Hauptsache gelten, festzustellen, dass bei hohen Lichtstärken und Helladaptation andere Gleichheitsbedingungen existieren, als bei geringen Lichtern und Dunkeladaptation." Während er im letzten Falle ebenfalls die Stäbchenkurven (der Helligkeitsverteilung) findet, erhält er im ersten Falle eine Kurve, die mit der für die fovea centralis, der Zapfenkurve, annähernd übereinstimmt. Er bezeichnet jene als die Kurve der Dämmerungswerte, diese als die der „Peripheriewerte" (genauer würde man sie als die „Zapfenkurve der Peripherie" bezeichnen). Die von mir indirekt beobachteten Helligkeitswerte entsprechen dem dritten Falle, dass die Feldhelligkeit gross, das Auge aber dunkeladaptiert ist.

Auffallend ist nach dem vorigen, dass Herr v. Kries in beiden von ihm untersuchten Fällen nur farblose Helligkeiten wahrnimmt, während man erwarten sollte, dass mit dem Vorwiegen der Zapfen der Eindruck der Farbe verbunden sein müsste.

Die Untersuchungen am Spektralflickerphotometer werden im hiesigen Institut fortgesetzt, und es wird sich dabei hoffentlich die Gelegenheit bieten, die peripheren Beobachtungen unter sonst gleichen Umständen auch bei einem genau eingehaltenen Zustande guter Helladaptation zu wiederholen und dadurch diesen letzten Punkt zu klären, jedenfalls aber die „Zapfenwerte der Peripherie" nach dieser sehr exakten Methode aufs neue und womöglich genauer zu bestimmen, als es bisher geschehen konnte.

---

[10]) J. v. Kries: „Kritische Bemerkungen zur Farbentheorie", Ztschr. f. Psych. etc. 19, S. 186. 1899.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

1. Es wurde für das normale Auge die spektrale Verteilung der Helligkeitswerte nach der Sehschärfemethode und die spektrale Verteilung der Flimmerwerte mittels des Spektralflickerphotometers gemessen. Der Vergleich zeigte, dass beide innerhalb der Fehlergrenzen identisch sind, während an Genauigkeit die Flickermethode der Sehschärfemethode weit überlegen ist. Das Spektralflickerphotometer erweist sich dadurch als ein empfindliches Instrument zum Helligkeitsvergleich zwischen verschiedenen spektralen Lichtern.
2. Mit Hilfe des Spektralflickerphotometers wurden die fovealen Helligkeitsempfindlichkeitskurven für zehn normale farbentüchtige Beobachter gewonnen. Sie haben ihr Maximum im Gelbgrün bei etwa 550 μμ, zeigen aber merkliche individuelle Verschiedenheiten.
3. Die foveale Empfindlichkeit desselben Beobachters zu verschiedenen Zeiten ergab sich als konstant.
4. Zahlreiche Helligkeitsvergleiche zwischen Farben von sehr verschiedenem spektralem Abstand zeigten, dass die Genauigkeit des Photometrierens beim Spektralflickerphotometer unverändert bleibt, wenn man die Wellenlängendifferenz der Farben etwa von 16 bis 170 μμ variiert.

   Da bei gleicher Temperaturänderung der Lichtquelle das Helligkeitsverhältnis zweier Farben sich um so stärker ändert, je grösser ihr spektraler Abstand ist, so folgt, dass die mit dem Flickerphotometer ausführbare optische Temperaturbestimmung am empfindlichsten wird, wenn man zwei weit auseinanderliegende Farben miteinander photometriert.
5. An zwei Fällen von angeborener totaler Farbenblindheit wurde die spektrale Verteilung der Helligkeitsempfindlichkeit für das Auge des Monochromaten untersucht.

Das Maximum ist übereinstimmend in beiden Fällen gegenüber der normalen Empfindlichkeit nach den kurzen Wellen hin verschoben; es liegt im Blaugrün bei etwa 515 μμ.

6. Es wurde die periphere Helligkeitsempfindlichkeit des normalen dunkeladaptierten Auges an einem kleinen hellen Felde in dunkler Umgebung bestimmt, und zwar im nasalen Gesichtsfelde unter 20 und 30° Abweichung von der direkten Sehlinie. Die Kurven verschieben sich mit wachsender Exzentrizität nach dem Blau hin und fallen schliesslich mit denen der Totalfarbenblinden zusammen. Hierdurch ist die bekannte Übereinstimmung zwischen den Stäbchen des normalen und den Netzhautelementen des total farbenblinden Auges aufs neue bestätigt. Es folgt ferner, dass die dunkeladaptierten Stäbchen des normalen Auges den Zapfen bei kleinem aber hellem Photometerfelde schon in 20° Abstand von der Netzhautmitte überlegen sind.

Zum Schlusse möchte ich auch an dieser Stelle noch Herrn Geheimrat Uhthoff, dessen liebenswürdiges Entgegenkommen mir die Untersuchung der beiden Totalfarbenblinden ermöglichte, dafür meinen besten Dank sagen.

Zu herzlichem Danke fühle ich mich ferner Herrn Professor Pringsheim verbunden für die wohlwollende Anteilnahme, die er meiner Arbeit entgegenbrachte.

Vor allem anderen aber empfinde ich aufrichtige Dankbarkeit für meinen hochverehrten Lehrer, Herrn Geheimrat Lummer, der mir während meiner ganzen Studienzeit mit immer gleicher Güte begegnete, und dem ich neben so vielem anderen auch die Anregung zu dieser Arbeit und dauernde Förderung während ihres Verlaufes zu verdanken habe.

Tabelle 1.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
λ in $\mu\mu$	Breite jeder Sektoröffnung Untere Grenze	Obere Grenze	Mittel	Spaltbreite	Relative Helligkeit H_λ	log H_λ	log R	log H_λ reduziert	$\log H_{\lambda(r)}$ — 0,932
659	5,42	10,52	7,97	50	1 360	3,134	1,672	4,806	3,874
639	23,54	31,75	27,64	5	3 922	3,594	1,704	5,298	4,366
619	15,35	21,50	18,42	5	5 885	3,770	1,754	5,524	4,592
599	12,85	14,42	13,64	5	7 947	3,900	1,809	5,709	4,777
590	10,43	11,25	10,84	5	10 000	4,000	1,823	5,823	4,891
580	14,42	14,42	14,42	5	7 517	3,876	1,854	5,730	4,798
559	16,41	20,77	18,59	5	5 831	3,766	1,925	5,691	4,759
539	29,54	57,54	43,54	5	2 490	3,396	2,033	5,429	4,497
519	57,94	76,91	67,42	5	1 608	3,206	2,076	5,282	4,350
499,5	10,89	15,11	13,00	50	834	2,921	2,175	5,096	4,164
479	14,07	35,36	24,72	150	146	2,164	2,260	4,424	3,492

Tabelle 2a.
Rechtsstellung des Apparates.

Spaltbreite in Trommelteilen I	II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres		Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Tourenzahl in der Minute
25	25	39,81	39,77	$\lambda_I = 615{,}7$	337
50	50	39,72		$\lambda_{II} = 572$	335

Tabelle 2b.
Linksstellung.

Spaltbreite in Trommelteilen I	II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres		Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Tourenzahl in der Minute
25	25	26,34	26,32	$\lambda_I = 566{,}1$	334
50	50	26,30		$\lambda_{II} = 608{,}8$	345

Tabelle 3a.
Rechtsstellung.

Fernrohr-stellung	λ_I	λ_{II}	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I	Tourenzahl
42,23	673	615,7	25	5,6	0,224	254
39,77	615,7	572			1 [nach Tab. 2a]	
37,53	572	538,7	12,5	25	0,500	289
35,33	538,7	511	7,7	25	0,308	247
33,04	511	488,2	7,6	30	0,253	200
30,68	488,2	469	15,9	40	0,398	100
28,28	469	452	17,5	50	0,350	54
25,80	452	437,2	33,3	100	0,333	40

Tabelle 3b.
Linksstellung.

Fernrohr-stellung	λ_I	λ_{II}	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I	Tourenzahl
24,05	608,8	665,2	4,4	25	0,176	244
26,32	566,1	608,8			1 [nach Tab. 2b]	
28,67	533	566,1	25	14,7	0,588	315
31,07	506	533	25	9,8	0,392	287
33,55	483,1	506	30	11,2	0,373	207
36,04	463,8	483,1	40	17,4	0,435	91
38,56	447,1	463,8	50	19,4	0,388	49
41,32	431,9	447,1	100	33,1	0,331	40

Tabelle 4.

Rechtsstellung		Linksstellung	
λ	Logarithmus des Flimmerwertes	λ	Logarithmus des Flimmerwertes
673	3,350	665,2	3,246
615,7	4,000	608,8	4,000
572	4,000	566,1	4,000
538,7	3,699	533	3,769
511	3,188	506	3,363
488,2	2,591	483,1	2,934
469	2,191	463,8	2,573
452	1,735	447,1	2,162
437,2	1,257	431,9	1,682

Tabelle 5.

1.	2.	3.	4.	5.	6.
λ	Logarithmus des Flimmerwertes F_λ aus der Rechtskurve	Linkskurve	Mittel	log R	log F_λ reduziert
660	3,528	3,347	3,447	0,559	4,006
640	3,773	3,659	3,720	0,618	4,338
620	3,968	3,901	3,936	0,660	4,596
600	4,058	4,043	4,051	0,705	4,756
580	4,038	4,049	4,044	0,754	4,798
570	3,988	4,016	4,002	0,784	4,786
560	3,913	3,969	3,942	0,815	4,757
550	3,824	3,906	3,867	0,845	4,712
540	3,712	3,834	3,777	0,878	4,655
530	3,562	3,730	3,654	0,904	4,558
520	3,379	3,594	3,500	0,941	4,441
510	3,165	3,430	3,317	0,975	4,292
500	2,940	3,259	3,128	1,001	4,129
480	2,448	2,870	2,708	1,086	3,794
460	1,934	2,437	2,255	1,170	3,425
440	1,385	1,975	1,773	1,247	3,020

Tabelle 6. Lampe B.
Temperatur des schwarzen Körpers $T = 1412^0$ abs.

λ	log S_λ	2 log tgα	log J_λ
680	0,234 — 6	0,750 — 1	0,984 — 7
670	0,167 — 6	0,760 — 1	0,927 — 7
660	0,098 — 6	0,782 — 1	0,880 — 7
640	0,953 — 7	0,855 — 1	0,808 — 7
620	0,795 — 7	0,926 — 1	0,721 — 7
610	0,712 — 7	0,954 — 1	0,666 — 7
600	0,625 — 7	0,994 — 1	0,619 — 7
590	0,535 — 7	0,033	0,568 — 7
580	0,441 — 7	0,102	0,543 — 7
570	0,343 — 7	0,169	0,512 — 7
560	0,240 — 7	0,222	0,462 — 7
550	0,134 — 7	0,251	0,385 — 7
540	0,022 — 7	0,262	0,284 — 7
530	0,906 — 8	0,287	0,193 — 7
520	0,784 — 8	0,319	0,103 — 7
510	0,657 — 8	0,381	0,038 — 7
500	0,524 — 8	0,453	0,977 — 8
480	0,238 — 8	0,570	0,808 — 8
460	0,924 — 9	0,647	0,571 — 8
440	0,577 — 9	0,757	0,334 — 8

Tabelle 7a.
Lampe A, erste Reihe:
Temperatur des schwarzen Körpers $T = 1470^0$ abs.

λ	log S_λ	2 log tg α	log J_λ
680	0,494 — 6	0,978 — 1	0,472 — 6
660	0,337 — 6	0,009	0,376 — 6
640	0,230 — 6	0,084	0,314 — 6
620	0,081 — 6	0,175	0,256 — 6
600	0,921 — 7	0,266	0,187 — 6
580	0,746 — 7	0,366	0,112 — 6
570	0,653 — 7	0,426	0,079 — 6

(Fortsetzung Tabelle 7a.)

λ	log S_λ	2 log tg α	log J_λ
560	0,557 — 7	0,475	0,032 — 6
550	0,456 — 7	0,520	0,976 — 7
540	0,350 — 7	0,580	0,930 — 7
530	0,240 — 7	0,633	0,873 — 7
520	0,125 — 7	0,682	0,807 — 7
510	0,005 — 7	0,748	0,753 — 7
500	0,879 — 8	0,839	0,718 — 7
480	0,608 — 8	0,997	0,605 — 7
460	0,309 — 8	1,233	0,542 — 7
440	0,980 — 9	1,536	0,516 — 7

Tabelle 7b.
Lampe A, zweite Reihe:
Temperatur des schwarzen Körpers $T = 1615^0$ abs.

λ	log S_λ	2 log tg α	log J_λ
680	0,064 — 5	0,346 — 1	0,410 — 6
660	0,954 — 6	0,404 — 1	0,358 — 6
640	0,835 — 6	0,458 — 1	0,293 — 6
620	0,706 — 6	0,520 — 1	0,226 — 6
600	0,566 — 6	0,588 — 1	0,154 — 6
580	0,414 — 6	0,669 — 1	0,083 — 6
570	0,333 — 6	0,705 — 1	0,038 — 6
560	0,248 — 6	0,735 — 1	0,983 — 7
550	0,160 — 6	0,780 — 1	0,940 — 7
540	0,067 — 6	0,800 — 1	0,867 — 7
530	0,971 — 7	0,858 — 1	0,829 — 7
520	0,870 — 7	0,900 — 1	0,770 — 7
510	0,764 — 7	0,954 — 1	0,718 — 7
500	0,653 — 7	0,997 — 1	0,650 — 7
480	0,414 — 7	0,083	0,497 — 7
460	0,151 — 7	0,180	0,331 — 7
440	0,860 — 8	0,269	0,129 — 7

Tabelle 8a.

Lampe C, erste Reihe:

Temperatur des schwarzen Körpers $T = 1489^0$ abs.

λ	$\log S_\lambda$	$2 \log \operatorname{tg} \alpha$	$\log J_\lambda$
680	0,575 — 6	0,793 — 1	0,368 — 6
660	0,450 — 6	0,847 — 1	0,297 — 6
640	0,315 — 6	0,912 — 1	0,227 — 6
620	0,170 — 6	0,988 — 1	0,158 — 6
600	0,012 — 6	0,064	0,076 — 6
580	0,841 — 7	0,177	0,018 — 6
570	0,750 — 7	0,218	0,968 — 7
560	0,655 — 7	0,258	0,913 — 7
550	0,556 — 7	0,315	0,871 — 7
540	0,452 — 7	0,355	0,807 — 7
530	0,344 — 7	0,404	0,748 — 7
520	0,231 — 7	0,468	0,699 — 7
510	0,113 — 7	0,537	0,650 — 7
500	0,989 — 8	0,597	0,586 — 7
480	0,722 — 8	0,757	0,479 — 7
460	0,429 — 8	0,950	0,379 — 7
440	0,105 — 8	1,080	0,185 — 7

Tabelle 8b.

Lampe C, zweite Reihe:

Temperatur des schwarzen Körpers $T = 1641^0$ abs.

λ	$\log S_\lambda$	$2 \log \operatorname{tg} \alpha$	$\log J_\lambda$
680	0,155 — 5	0,160 — 1	0,315 — 6
660	0,048 — 5	0,224 — 1	0,272 — 6
640	0,932 — 6	0,275 — 1	0,207 — 6
620	0,806 — 6	0,331 — 1	0,137 — 6
600	0,670 — 6	0,396 — 1	0,066 — 6
580	0,521 — 6	0,461 — 1	0,982 — 7
570	0,442 — 6	0,499 — 1	0,941 — 7

(Fortsetzung Tabelle 8b.)

λ	log S_λ	2 log tg α	log J_λ
560	0,359 — 6	0,542 — 1	0,901 — 7
550	0,273 — 6	0,574 — 1	0,847 — 7
540	0,183 — 6	0,627 — 1	0,810 — 7
530	0,088 — 6	0,661 — 1	0,749 — 7
520	0,990 — 7	0,713 — 1	0,703 — 7
510	0,886 — 7	0,756 — 1	0,642 — 7
500	0,778 — 7	0,772 — 1	0,550 — 7
480	0,544 — 7	0,850 — 1	0,394 — 7
460	0,287 — 7	0,930 — 1	0,217 — 7
440	0,001 — 7	0,010	0,011 — 7

Tabelle 9a.
Rechtsstellung.

Spaltbreite in Trommelteilen I	II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres		Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Mittl. Fehler d. Mittels aus 10 Einstellungen in $\mu\mu$	Tourenzahl
25	25	39,49	39,49	$\lambda_I = 609,3$	$\Delta_{\lambda_I} = 0,5$; $\Delta_{\lambda_{II}} = 0,4$	286
50	50	39,49		$\lambda_{II} = 567,7$	$\Delta_{\lambda_I} = 0,5$; $\Delta_{\lambda_{II}} = 0,4$	307

Tabelle 9b.
Linksstellung.

Spaltbreite I	II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres		Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Mittl. Fehler d. Mittels aus 10 Einstellungen in $\mu\mu$	Tourenzahl
25	25	26,16	26,16	$\lambda_I = 568,8$	$\Delta_{\lambda_I} = 0,4$; $\Delta_{\lambda_{II}} = 0,5$	286
50	50	26,16		$\lambda_{II} = 612,6$	$\Delta_{\lambda_I} = 0,5$; $\Delta_{\lambda_{II}} = 0,5$	290

Tabelle 10a. Rechtsstellung.

Fernrohrstellung	λ_I	λ_{II}	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I	Mittel	Mittl. Fehler des Mittels in % von I/II oder II/I	Tourenzahl
41,87	664,2	609,3	30	6,2	0,207	0,195	1,6	193
			60	11,0	0,183		0,9	225
39,49	609,3	567,7	25	24,4	1,025	1,058 [= 1, nach Tab. 9a.]	0,8	265
			50	47,4	1,055		2,3	281
			26,6	25	1,064		2,6	261
			54,5	50	1,090		1,1	284
37,27	567,7	535	14,8	25	0,592	0,611	1,4	218
			31,5	50	0,630		1,3	221
35,08	535	507,7	9,8	25	0,392	0,389	1,0	174
			19,3	50	0,386		2,1	204
32,76	507,7	485	9,9	30	0,330	0,310	2,0	168
			17,4	60	0,290		3,4	218
30,41	485	466,1	24,2	60	0,403	0,400	2,9	133
			47,5	120	0,396		2,1	177
28,00	466,1	449,8	32,8	75	0,437	0,428	3,4	116
			62,7	150	0,418		2,1	100
25,54	449,8	434,8	39,2	100	0,392	0,400	4,6	104
			61,1	150	0,407		1,5	93
40,70	635,7	587,7	25	13,4	0,536	0,516	1,5	213
			50	24,8	0,496		1,6	243
38,41	587,7	550,6	17,2	25	1,453	1,390	1,7	230
			37,7	50	1,326		2,1	257
36,20	550,6	521,4	13,1	25	1,908	1,901	0,8	184
			26,4	50	1,894		2,3	225
33,98	521,4	496,5	7,4	25	0,296	0,288	2,7	172
			14,0	50	0,280		1,4	177
31,65	496,5	475,6	11,1	30	0,370	0,379	0,9	154
			23,3	60	0,388		3,4	208
29,29	475,6	458,4	25,4	60	0,423	0,399	3,2	134
			45,0	120	0,375		0,9	162
26,88	458,4	443,1	39,0	90	0,433	0,432	3,1	102
			64,6	150	0,431		3,3	99

Tabelle 10b. Linksstellung.

Fernrohrstellung	λ_I	λ_{II}	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I	Mittel	Mittl. Fehler des Mittels in % von I/II oder II/I	Tourenzahl
23,86	612,6	671,2	4,6	30	0,153	0,147	4,3	271
			8,4	60	0,140		3,6	252
26,16	568,8	612,6	25,4	25	1,016	1,027 = 1, nach Tab. 9b.	1,2	271
			51,7	50	1,034		2,7	286
			25	25,3	0,988		2,0	262
			50	46,7	1,071		1,5	280
28,56	534	568,8	25	14,1	0,564	0,552	0,7	232
			50	27,0	0,540		1,1	262
31,00	506,3	534	25	8,4	0,336	0,341	1,2	175
			50	17,3	0,346		1,2	230
33,44	483,3	506,3	30	9,0	0,300	0,303	4,4	176
			60	18,4	0,307		1,6	189
35,86	464,6	483,3	60	22,5	0,375	0,363	4,4	132
			120	42,0	0,350		2,9	137
38,40	448,7	464,6	75	26,9	0,359	0,361	3,7	85
			150	54,6	0,364		2,9	103
41,00	433	448,7	100	32,9	0,329	0,337	4,3	95
			150	51,8	0,345		4,1	77
24,99	589,5	639,8	13,4	25	0,536	0,521	2,2	253
			25,3	50	0,506		2,4	256
27,33	550,8	589,5	25	16,8	1,488	1,497	1,2	243
			50	33,2	1,506		2,1	275
29,75	520,2	550,8	25	11,3	2,212	2,198	1,8	191
			50	22,9	2,183		1,3	233
32,21	494,3	520,2	25	6,5	3,846	3,709	1,5	168
			50	14,0	3,571		2,1	208
34,67	473,4	494,3	30	11,6	0,387	0,385	2,6	159
			60	23,0	0,383		3,0	170
37,09	456,9	473,4	60	20,9	0,348	0,348	4,3	127
			120	41,8	0,348		1,4	132
39,61	441,3	456,9	90	31,4	0,349	0,369	1,6	77
			150	58,4	0,389		3,6	84

Tabelle 11.

Rechtsstellung			Linksstellung		
λ	Logarithmus der Helligkeit	Bemerkungen	λ	Logarithmus der Helligkeit	Bemerkungen
664,2	3,290		671,2	3,167	
609,3	4,000	Willkürlich	612,6	4,000	Willkürlich
567,7	4,000	angesetzt.	568,8	4,000	angesetzt.
535,0	3,786		534,0	3,742	
507,7	3,376		506,3	3,275	
485,0	2,867		483,3	2,756	
466,1	2,469		464,6	2,316	
449,8	2,101		448,7	1,874	
434,8	1,703		433	1,401	
635,7	3,744		639,8	3,806	
587,7	4,032		589,5	4,089	
550,6	3,889		550,8	3,913	
521,4	3,610	Rechnerisch interpoliert.	520,2	3,571	
496,5	3,069		494,3	3,002	Rechnerisch interpoliert.
475,6	2,648		473,4	2,588	
458,4	2,249		456,9	2,129	
443,1	1,884		441,3	1,696	

Tabelle 12.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
λ	$\log H_\lambda$ (Mittel)	log R	$\log H_{\lambda(r)}$	$\log J_\lambda$ [Lampe C]	$\log J_\lambda + 8{,}884$	$\log E_\lambda$	E_λ
680	2,853	0,498	3,351	0,343 — 6	3,227	0,124	1,3
660	3,437	0,556	3,993	0,285 — 6	3,169	0,824	6,7
640	3,750	0,615	4,365	0,217 — 6	3,101	1,264	18,4
620	3,943	0,656	4,599	0,148 — 6	3,032	1,567	36,9
600	4,051	0,705	4,756	0,071 — 6	2,955	1,801	63,2
580	4,049	0,761	4,810	0,000 — 6	2,884	1,926	84,3
570	4,020	0,790	4,810	0,955 — 7	2,839	1,971	93,5
560	3,969	0,804	4,773	0,907 — 7	2,791	1,982	95,9
550	3,903	0,840	4,743	0,859 — 7	2,743	2,000	100,0

(Fortsetzung Tabelle 12.)

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
λ	$\log H_\lambda$ (Mittel)	log R	$\log H_{\lambda(r)}$	$\log J_\lambda$ [Lampe C]	$\log J_\lambda$ +8,884	$\log E_\lambda$	E_λ
540	3,817	0,871	4,688	0,809 — 7	2,693	1,995	98,9
530	3,707	0,903	4,610	0,749 — 7	2,633	1,977	94,8
520	3,559	0,941	4,500	0,701 — 7	2,585	1,915	82,2
510	3,379	0,960	4,339	0,646 — 7	2,530	1,809	64,4
500	3,174	1,004	4,178	0,568 — 7	2,452	1,726	53,2
480	2,730	1,078	3,808	0,439 — 7	2,323	1,485	30,5
460	2,255	1,185	3,440	0,305 — 7	2,189	1,251	17,8
440	1,744	1,234	2,978	0,107 — 7	1,991	0,987	9,7

Tabelle 13.

	Helligkeitsempfindlichkeit für								
λ	Frl. H. K.	Herrn F. K.	Frl. L. B.	Frl. M. S.	Herrn Dr. K.	Herrn L.	Herrn Prof. S.	Herrn Th.	Frl. H. S.
680	1,9	—	2,2	—	—	—	—	—	—
660	6,9	—	7,0	4,0	2,9	3,4	3,0	4,4	3,9
640	18,2	13,7	17,4	10,6	9,1	9,5	9,2	11,2	10,9
620	39,2	25,5	37,0	23,4	21,7	22,7	22,8	24,6	24,5
600	65,6	44,3	63,5	43,3	42,9	44,7	45,7	45,5	45,7
580	84,9	72,4	83,8	63,5	70,5	69,5	65,8	67,3	68,5
570	92,0	86,3	91,0	73,3	83,4	79,8	74,5	76,9	78,9
560	98,6	96,6	97,5	83,0	93,1	90,0	83,4	86,1	87,9
550	100,0	98,6	99,1	89,7	96,2	95,1	90,6	92,0	94,2
540	100,0	100,0	100,0	98,6	100,0	100,0	98,4	99,5	100,0
530	93,1	94,2	92,0	100,0	93,5	98,2	100,0	100,0	98,2
520	82,0	86,3	79,6	95,5	82,4	89,7	92,7	94,0	91,2
510	66,7	72,1	64,9	83,6	64,0	76,4	79,8	81,1	79,1
500	47,0	55,0	47,2	67,5	43,3	59,7	64,1	64,1	62,8
480	25,8	35,6	30,1	49,3	22,9	41,2	47,8	44,5	41,2
460	13,9	19,2	17,8	32,7	11,9	24,0	31,0	23,8	23,4
440	6,6	9,3	9,1	19,2	5,9	11,4	17,3	10,5	10,2

Tabelle 14.

λ_I	λ_{II}	Messungen vom 5. VII. Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I	Messungen vom 8. VII. Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I
612,6	671,2	4,6	30	0,153	4,6	30	0,153
568,8	612,6	24,6	25	0,984	25,4	25	1,016 *
		25	25,3	0,988	25	25,3	0,988
534	568,8	25	14,3	0,572	25	14,1	0,564 *
506,3	534	25	8,5	0,340	25	8,4	0,336
483,3	506,3	30	9,2	0,307	30	9,0	0,300
464,6	483,3	60	22,5	0,375	60	22,5	0,375
448,7	464,6	75	26,7	0,356	75	26,9	0,359
433	448,7	100	34,6	0,346	100	32,9	0,329 *

Tabe

Messungen bei ein

2 mm				4 mm				6 mm			
λ_1	λ_2	Mittlerer Fehler in %	Größter Fehler in %	λ_1	λ_2	Mittlerer Fehler in %	Größter Fehler in %	λ_1	λ_2	Mittlerer Fehler in	Gr te
674,2	613,3	1,0	2,2	ca. 730	620	7,0	21,4	660	555	0,8	
		1,3	3,9			7,4	31,2			1,4	
613,3	568	1,0	3,4	659	578	3,5	12,7	640	544	1,4	
		1,5	5,1			2,2	5,9			3,2	1
		1,8	4,6	639	566	0,9	2,3	620	533	0,8	
		3,3	11,5			1,8	6,7			1,0	
568	532,5	2,0	5,7	619	553	1,3	3,7	600	521	1,6	
		2,0	5,7			2,4	7,5			3,2	1
532,5	504,3	3,0	9,0	600	539	3,0	10,2	580	509	0,5	
		1,5	4,5			1,6	4,7			1,5	
504,3	481	4,2	13,0	580	526	2,0	5,5	560	495	1,6	
		2,4	7,4			1,2	3,4			2,9	
481	461,8	3,5	11,1	560	511	2,6	7,7	540	483	0,8	
		3,8	11,4			2,4	8,1			2,5	
461,8	445,3	5,2	15,4	540	497	3,5	13,2	520	470	1,9	
		4,1	11,8			4,1	13,9			3,3	1
445,3	429,8	4,6	17,3	521	483	4,4	15,8	500	457	0,6	
		8,7	25,6			6,5	21,4			2,9	
				501	468	4,0	14,5	480	442	4,1	1
						2,0	5,1			2,5	
				481	452	5,8	16,7				
						1,6	4,7				
				461	436	3,2	10,5				
						3,9	10,8				
				449	427	6,7	23,5				
						6,9	26,3				

ltabstand von

	8 mm			10 mm				12 mm			
	λ_2	Mittlerer Fehler	Größter Fehler in %	λ_1	λ_2	Mittlerer Fehler	Größter Fehler in %	λ_1	λ_2	Mittlerer Fehler	Größter Fehler in %
0	544	1,4	5,2	680	525	1,1	3,4	680	508	0,8	2,2
		2,6	9,0			3,1	9,6			1,9	5,0
0	535	2,7	10,0	660	517	2,2	8,1	660	500	4,0	12,7
		3,4	10,7			2,9	10,1			2,0	6,6
0	525	2,4	7,0	640	508	1,8	5,8	640	493	2,4	6,9
		2,3	7,2			2,7	8,8			2,0	5,7
0	515	0,7	2,4	620	499	1,8	5,3	620	485	2,4	7,7
		1,9	6,6			2,2	8,2			2,6	9,5
0	504,5	1,1	3,9	600	490	3,1	9,3	600	476	2,5	7,7
		0,8	2,5			3,1	11,1			2,3	7,8
0	493	2,0	6,7	580	480	2,0	6,3	580	468	1,0	4,2
		1,1	4,1			4,5	11,6			2,5	8,9
0	482	2,6	7,5	560	470	3,4	8,8	560	459	2,5	6,8
		2,0	6,5			4,2	13,9			1,2	4,1
0	470,5	2,2	6,0	540	460	2,3	8,5	540	450	2,0	6,4
		3,0	8,6			2,1	7,1			3,4	11,5
0	459	2,2	7,4	520	449	2,0	4,7	520	439	3,0	10,0
		3,0	9,5			3,8	11,4			2,4	8,5
0	447	1,1	4,1	500	437	1,9	7,7				
		3,4	13,6			3,0	10,2				
0	433	3,2	9,0								
		4,3	12,4								

Tabelle 16.

Messungen bei 2 mm Spaltabstand				Messungen bei 4 mm Spaltabstand			
Rechtsstellung		Linksstellung		Rechtsstellung		Linksstellung	
λ	$\log H_\lambda$	λ	$\log H_\lambda$	λ	$\log H_\lambda$	λ	$\log H_\lambda$
698	1,218	651,8	2,241	632,5	2,644	625,6	2,756
631,5	2,501	598,6	3,422	562,5	4,000	556	4,000
584,4	3,489	558	4,000	514	4,000	508	4,000
548	4,000	525,8	4,000	477,7	3,494	473,3	3,483
518,8	4,000	499,8	3,667	450	2,892	447,5	2,881
494,5	3,827	478	3,218	427	2,032		
473,8	3,569	460,2	2,711				
457	3,284	444,7	2,076				
441,7	2,984	430	1,438				
427	2,635						

Tabelle 17.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
λ	$\log H_\lambda$ (Mittel)	$\log R$	$\log H_{\lambda(r)}$	$\log J_\lambda$ [LampeA]	$\log J_\lambda + 9{,}179$	$\log E_\lambda$	E_λ
660	2,008	0,556	2,564	0,367—6	3,546	0,018—1	0,1
640	2,447	0,615	3,062	0,303—6	3,482	0,580—1	0,4
620	2,884	0,656	3,540	0,241—6	3,420	0,120	1,3
600	3,317	0,705	4,022	0,171—6	3,350	0,672	4,7
580	3,688	0,761	4,449	0,100—6	3,279	1,170	14,8
570	3,840	0,790	4,630	0,059—6	3,238	1,392	24,7
560	3,964	0,804	4,768	0,008—6	3,187	1,581	38,1
550	4,045	0,840	4,885	0,959—7	3,138	1,747	55,8
540	4,083	0,871	4,954	0,899—7	3,078	1,876	75,2
530	4,076	0,903	4,979	0,851—7	3,030	1,949	88,9
520	4,027	0,941	4,968	0,789—7	2,968	2,000	100,0
510	3,944	0,960	4,904	0,736—7	2,915	1,989	97,5
500	3,830	1,004	4,834	0,685—7	2,864	1,970	93,3
480	3,537	1,078	4,615	0,555—7	2,734	1,881	76,0
460	3,151	1,185	4,336	0,449—7	2,628	1,708	51,1
440	2,647	1,234	3,881	0,364—7	2,543	1,338	21,8

Tabelle 18.

λ	log H_λ	λ	log H_λ
641,4	2,341	497	3,708
591,3	3,502	476	3,353
553	4,000	458	2,850
522,5	4,000	442,3	2,228

Tabelle 19.

λ	log H_λ	log R	log $H_{\lambda\,(r)}$	log J_λ [Lampe B]	log J_λ + 9,801	log E_λ	E_λ
640	2,387	0,628	3,015	0,808 — 7	3,609	0,406 — 1	0,3
620	2,896	0,663	3,559	0,721 — 7	3,522	0,037	1,1
610	3,116	0,686	3,802	0,666 — 7	3,467	0,335	2,2
600	3,327	0,703	4,030	0,619 — 7	3,420	0,610	4,1
590	3,529	0,728	4,257	0,568 — 7	3,369	0,888	7,7
580	3,691	0,763	4,454	0,543 — 7	3,344	1,110	12,9
570	3,827	0,789	4,616	0,512 — 7	3,313	1,303	20,1
560	3,939	0,810	4,749	0,462 — 7	3,263	1,486	30,6
550	4,025	0,839	4,864	0,385 — 7	3,186	1,678	47,6
540	4,069	0,872	4,941	0,284 — 7	3,085	1,856	71,8
530	4,048	0,903	4,951	0,193 — 7	2,994	1,957	90,6
520	3,980	0,924	4,904	0,103 — 7	2,904	2,000	100,0
510	3,888	0,949	4,837	0,038 — 7	2,839	1,998	99,5
500	3,757	0,998	4,755	0,977 — 8	2,778	1,977	94,8
480	3,419	1,085	4,504	0,808 — 8	2,609	1,895	78,5
460	2,917	1,155	4,072	0,571 — 8	2,372	1,700	50,1
440	2,113	1,236	3,349	0,334 — 8	2,135	1,214	16,4

Tabelle 20.

λ	Logarithmus der Helligkeit nach direkt. Beobachtungen von			nach indirekten Beob. von	
	Herrn Gehrt. L.	H. B.	W. [total farbenblind]	Herrn Gehrt. L.	H. B.
538,5	4,069	4,069	4,069	4,069	4,069
511	3,544	3,583	3,897	3,938	3,878
487,5	2,876	2,923	3,559	3,646	3,546
468,3	2,393	2,435	3,162	3,277	3,080
451,2	1,866	1,944	2,593	2,809	—

Tabelle 21. Aufsuchen der gleich hellen Farben bei 20° Exzentrizität der beobachtenden Netzhautstelle.

Spaltbreite I	Spaltbreite II	Einstellung des Beobacht.-fernrohres		Gleich helle Wellenlängen in μμ	Mittlere Fehler des Mittels in μμ	Touren-zahl
25	25	29,03	29,06	$\lambda_I = 528$	$\Delta_{\lambda_I} = 2{,}3$; $\Delta_{\lambda_{II}} = 2{,}8$	213
50	50	29,10		$\lambda_{II} = 560$	$\Delta_{\lambda_I} = 2{,}8$; $\Delta_{\lambda_{II}} = 3{,}4$	236

Tabelle 22. Helligkeitsmessungen bei 20° Exzentrizität.

Fernrohr-stellung	λ_I	λ_{II}	Spalt-breite I	Spalt-breite II	I/II oder II/I	Mittel	Mittl. Fehler des Mittels in % von I/II oder II/I	Touren-zahl
24,42	601	654,7	9,3	25	0,372	0,361	4,3	214
			17,5	50	0,350		7,4	229
26,70	560	601	15,0	25	0,600	0,525	9,3	208
			22,5	50	0,450		8,0	227
29,06	528	560	14,2	15	0,947	0,998	8,5	219
			26,0	25	1,040		7,7	203
			15	14,4	1,042		10,4	222
			25	26,0	0,962		8,8	219
31,50	501,8	528	20	12,5	0,625	0,556	7,2	216
			40	19,5	0,488		8,7	237
33,99	479,3	501,8	20	9,2	0,460	0,440	6,5	210
			40	16,8	0,420		11,3	226
36,48	460,5	479,3	30	13,3	0,443	0,407	10,5	209
			60	22,2	0,370		8,6	218
39,07	444,2	460,5	30	10,8	0,360	0,350	6,5	186
			60	20,4	0,340		10,3	213
41,86	429	444,2	30	10,8	0,360	0,321	13,9	191
			60	16,9	0,282		10,7	205

Tabelle 23.

λ	log H_λ	λ	log H_λ
654,7	3,278	479,3	3,389
601	3,720	460,5	2,998
560	4,000	444,2	2,542
528	4,000	429	2,049
501,8	3,745		

Tabelle 24.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
λ	log H_λ	log R	log$H_{\lambda(r)}$	log J_λ [Lampe A]	log J_λ + 9,106	log E_λ	E_λ
640	3,399	0,585	3,984	0,303 — 6	3,409	0,575	3,8
620	3,567	0,638	4,205	0,241 — 6	3,347	0,858	7,2
600	3,728	0,690	4,418	0,171 — 6	3,277	1,141	13,8
580	3,877	0,752	4,629	0,098 — 6	3,204	1,425	26,6
570	3,939	0,789	4,728	0,059 — 6	3,165	1,563	36,6
560	4,000	0,823	4,823	0,008 — 6	3,114	1,709	51,2
550	4,045	0,851	4,896	0,959 — 7	3,065	1,831	67,8
540	4,049	0,886	4,935	0,899 — 7	3,005	1,930	85,1
530	4,015	0,922	4,937	0,851 — 7	2,957	1,980	95,5
520	3,941	0,954	4,895	0,789 — 7	2,895	2,000	100,0
510	3,844	0,987	4,831	0,736 — 7	2,842	1,989	97,5
500	3,724	1,002	4,726	0,685 — 7	2,791	1,935	86,1
480	3,399	1,086	4,485	0,555 — 7	2,661	1,824	66,7
460	2,983	1,176	4,159	0,449 — 7	2,555	1,604	40,2
440	2,411	1,279	3,690	0,364 — 7	2,470	1,220	16,6

Tabelle 25.

Aufsuchen der gleich hellen Farben bei 30° Exzentrizität der beobachtenden Netzhautstelle.

Spaltbreite I	Spaltbreite II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres	Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Mittlerer Fehler des Mittels in $\mu\mu$	Tourenzahl
25	25	29,70 } 29,77	$\lambda_I = 520$	$\Delta\lambda_I = 1{,}6$; $\Delta\lambda_{II} = 1{,}9$	223
50	50	29,83 }	$\lambda_{II} = 550$	$\Delta\lambda_I = 1{,}7$; $\Delta\lambda_{II} = 2{,}1$	213

Tabelle 26.

Helligkeitsmessungen bei 30° Exzentrizität.

Fernrohr-stellung	λ_I	λ_{II}	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I	Mittel	Mittl. Fehler des Mittels in % von I/II oder II/I	Touren-zahl
			7,8	20	0,390		6,4	196
25,05	588,2	638	14,0	40	0,350	0,370	8,6	201
			8,5	20	0,425		8,2	208
27,37	550	588,2	16,7	40	0,418	0,421	6,6	208
			15,5	15	1,033		9,7	210
			30,6	30	1,020		7,2	207
29,77	520	550	15	16,0	0,938	1,003	7,5	213
			30	29,4	1,020		7,1	211
			20	11,9	0,595		6,7	193
32,22	494,7	520	40	21,1	0,528	0,561	5,7	192
			20	9,5	0,475		8,4	186
34,71	473,9	494,7	40	16,2	0,405	0,440	6,2	196
			25	10,1	0,404		5,9	172
37,19	456	473,9	50	19,4	0 388	0,396	8,3	195
			30	9,8	0,327		8,2	164
39,78	440,6	456	60	18,9	0,315	0,321	7,4	193
			30	8,6	0,287		8,1	165
42,61	426	440,6	60	17,5	0,292	0,289	10,3	186

Tabelle 27.

λ	log H_λ	λ	log H_λ
638	3,192	473,9	3,392
588,2	3,624	456	2,990
550	4,000	440,6	2,497
520	4,000	426	1,958
494,7	3,749		

Tabelle 28.

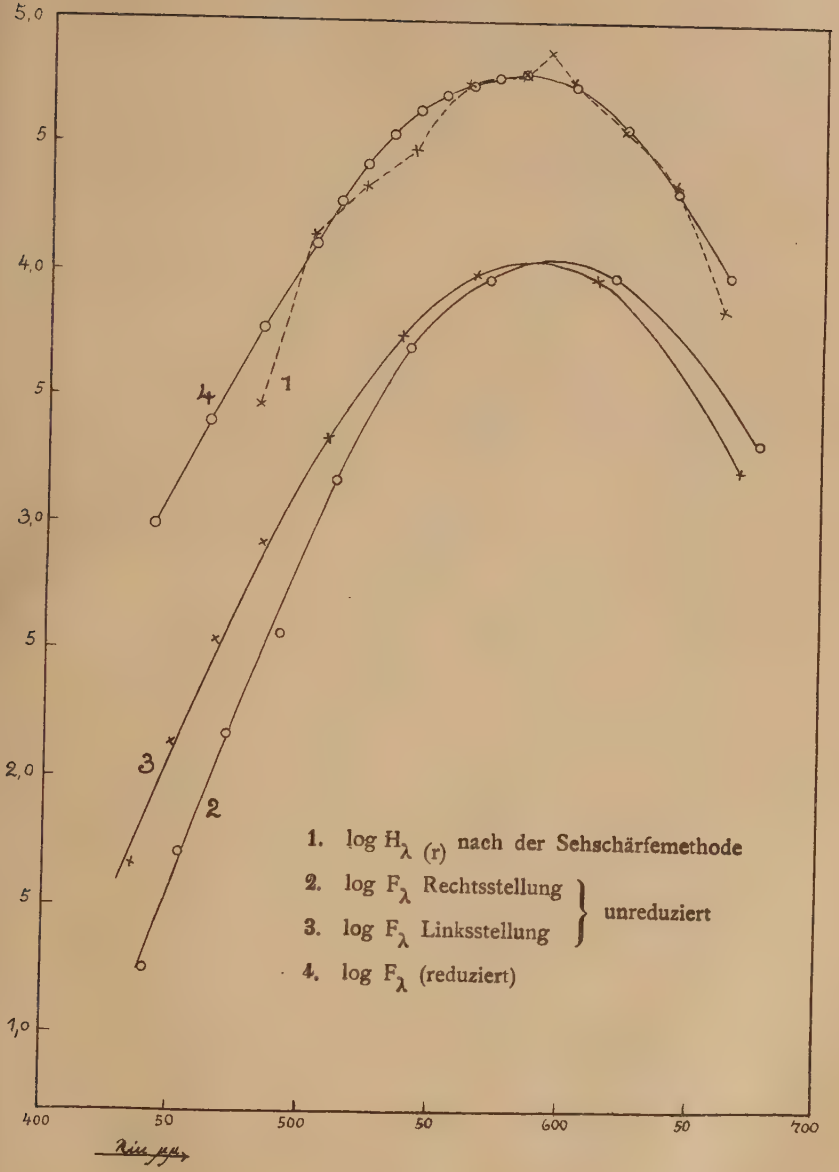
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
λ	$\log H_\lambda$	$\log R$	$\log H_{\lambda(r)}$	$\log J_\lambda$ [Lampe A]	$\log J_\lambda + 9{,}173$	$\log E_\lambda$	E_λ
640	3,177	0,585	3,762	0,303 — 6	3,476	0,286	1,9
620	3,350	0,638	3,988	0,241 — 6	3,414	0,574	3,7
600	3,530	0,690	4,220	0,171 — 6	3,344	0,876	7,5
580	3,713	0,752	4,465	0,098 — 6	3,271	1,194	15,6
570	3,817	0,789	4,606	0,059 — 6	3,232	1,374	23,7
560	3,913	0,823	4,736	0,008 — 6	3,181	1,555	35,9
550	4,000	0,851	4,851	0,959 — 7	3,132	1,719	52,4
540	4,050	0,886	4,936	0,899 — 7	3,072	1,864	73,1
530	4,048	0,922	4,970	0,851 — 7	3,024	1,946	88,3
520	4,000	0,954	4,954	0,789 — 7	2,962	1,992	98,2
510	3,922	0,987	4,909	0,736 — 7	2,909	2,000	100,0
500	3,820	1,002	4,822	0,685 — 7	2,858	1,964	92,0
480	3,506	1,086	4,592	0,555 — 7	2,728	1,864	73,1
460	3,086	1,176	4,262	0,449 — 7	2,622	1,640	43,7
440	2,478	1,279	3,757	0,364 — 7	2,537	1,220	16,6

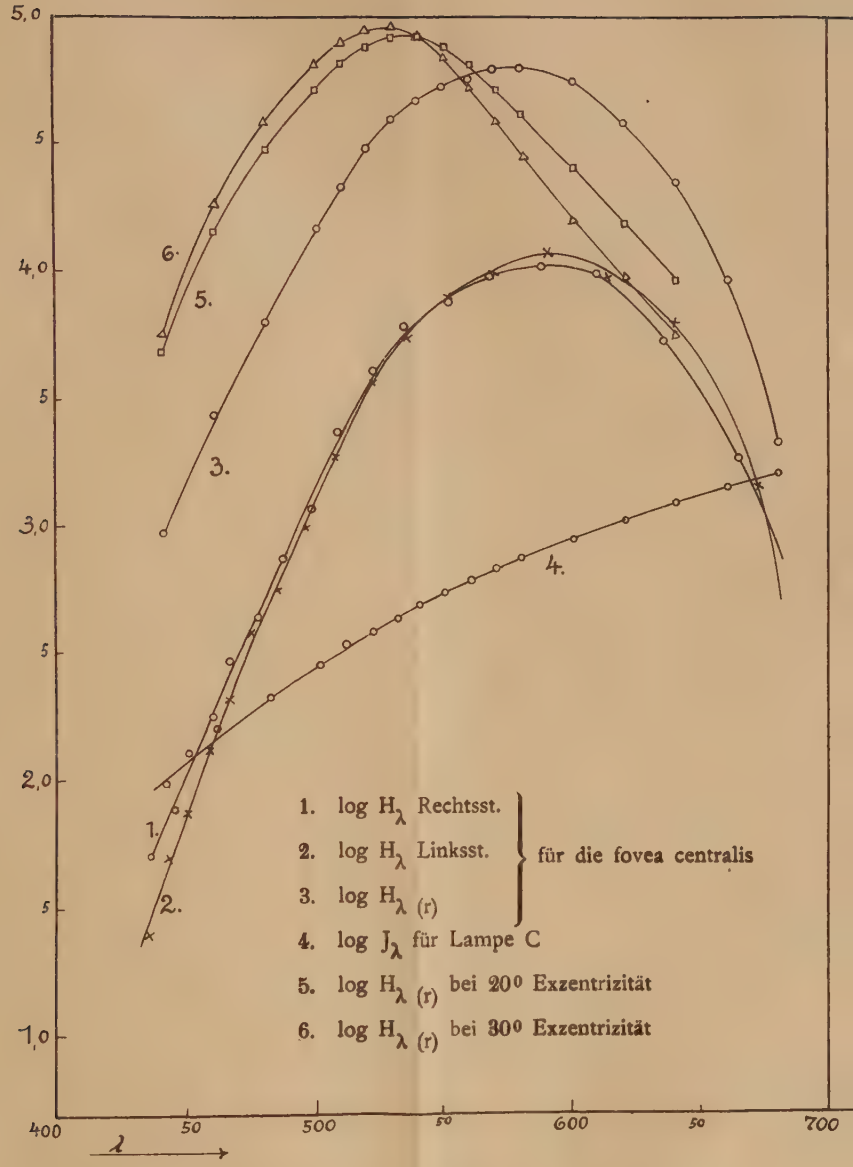
Tabelle 29.

Aufsuchen der gleich hellen Farben bei 40° Exzentrizität der beobachtenden Netzhautstelle.

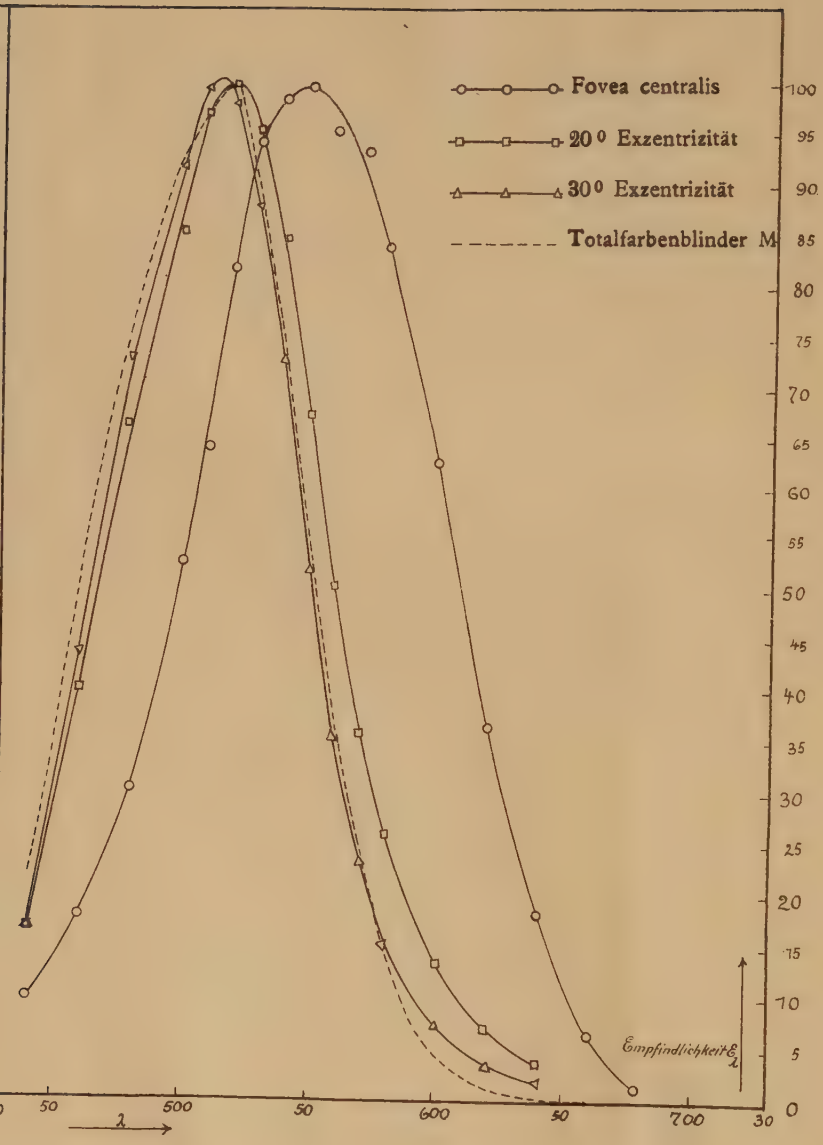
Spaltbreite I	Spaltbreite II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres		Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Mittlerer Fehler des Mittels in $\mu\mu$	Tourenzahl
25	25	29,96	29,76	$\lambda_I = 520{,}1$	$\Delta\lambda_I = 1{,}3$; $\Delta\lambda_{II} = 1{,}6$	209
50	50	29,57		$\lambda_{II} = 550{,}3$	$\Delta\lambda_I = 1{,}1$; $\Delta\lambda_{II} = 1{,}4$	196

Tafel I.

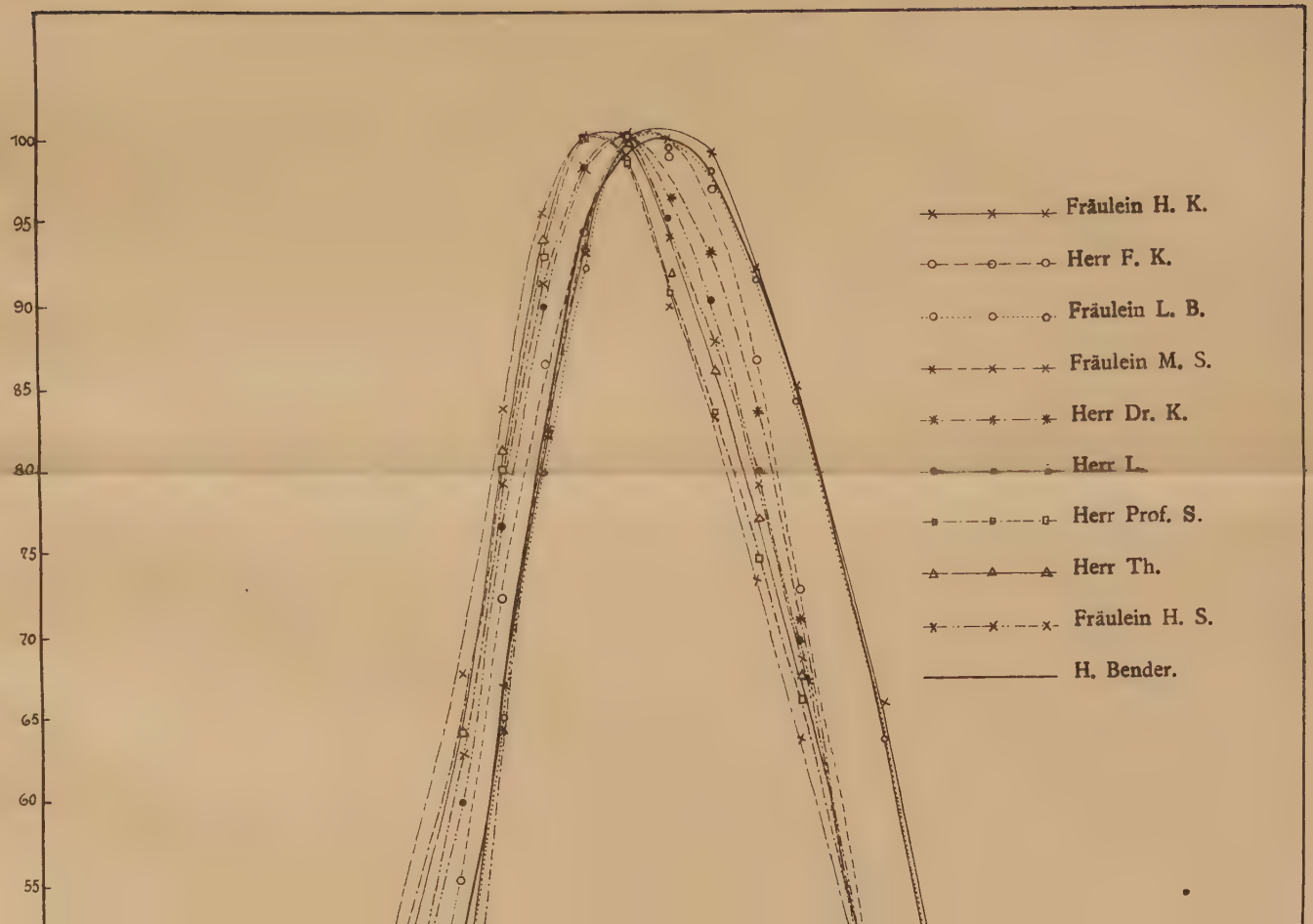

5,0
5
4,0
5
3,0
5
2,0
5
1,0
400
50
500
50
600
50
700
λin μμ
4
1
3
2
1. log H_λ (r) nach der Sehschärfemethode
2. log F_λ Rechtsstellung
3. log F_λ Linksstellung
} unreduziert
4. log F_λ (reduziert)

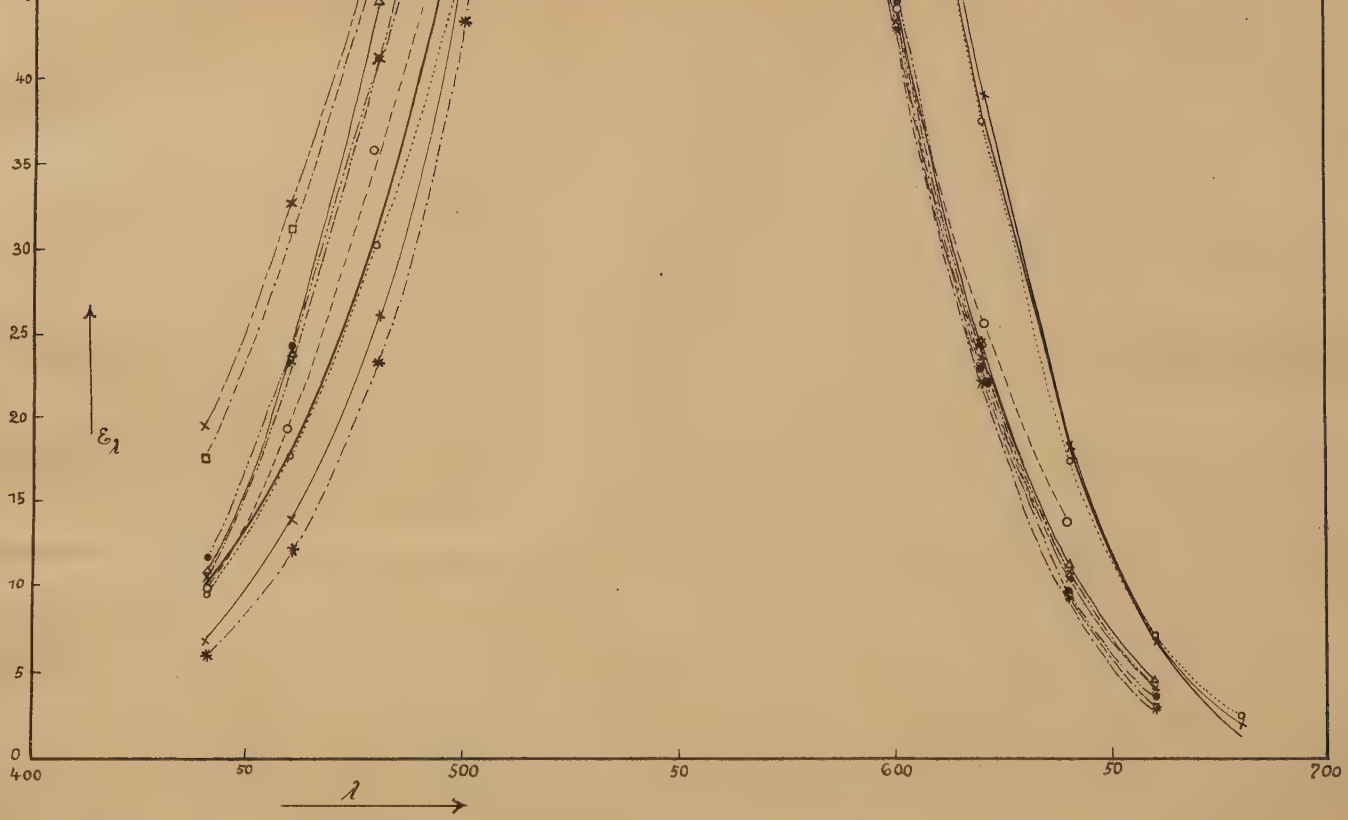

5,0
5
4,0
5
3,0
5
2,0
5
1,0
400
50
500
50
600
50
700
λ
1.
2.
3.
4.
5.
6.
1. log H_λ Rechtsst.
2. log H_λ Linksst.
3. log H_λ (r)
für die fovea centralis
4. log J_λ für Lampe C
5. log H_λ (r) bei 20° Exzentrizität
6. log H_λ (r) bei 30° Exzentrizität

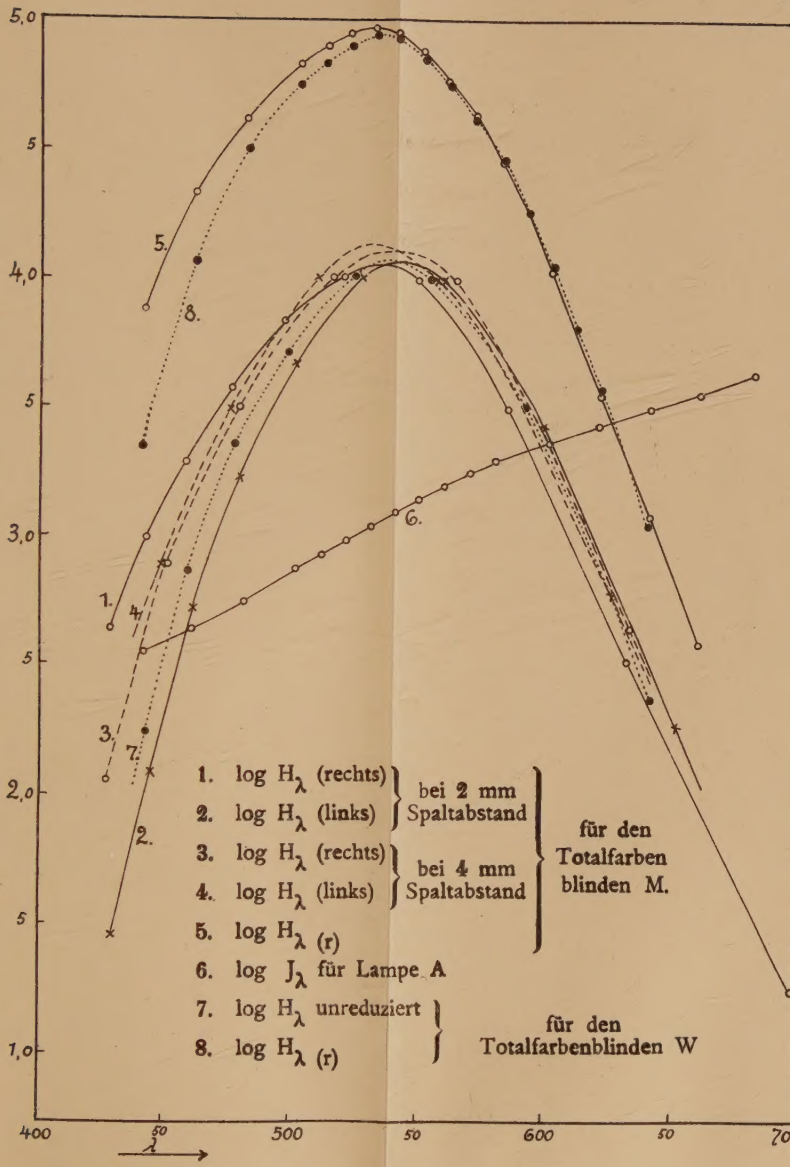
II.


Fovea centralis
20° Exzentrizität
30° Exzentrizität
Totalfarbenblinder M
100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Empfindlichkeit ε_λ
50
500
50
600
50
700
30
λ

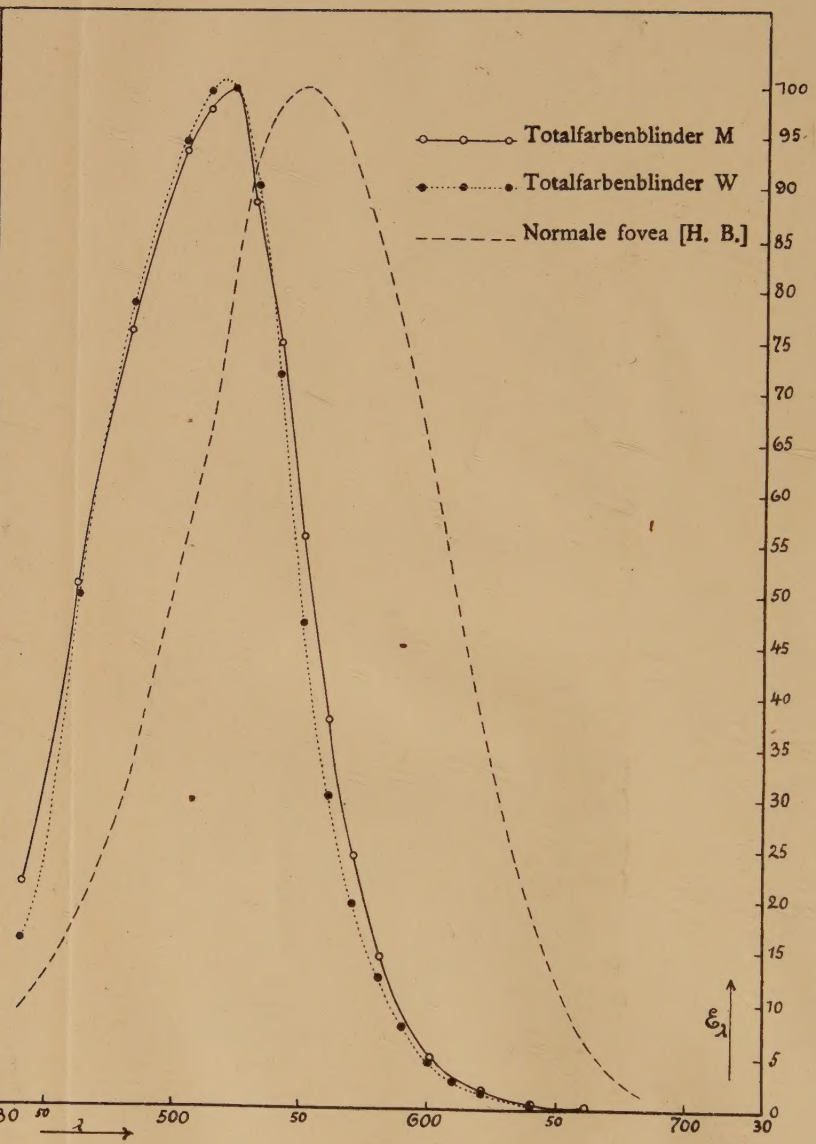
Tafel III.


100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
Fräulein H. K.
Herr F. K.
Fräulein L. B.
Fräulein M. S.
Herr Dr. K.
Herr L.
Herr Prof. S.
Herr Th.
Fräulein H. S.
H. Bender.


40
35
30
25
20
15
10
5
0
ε_λ
400
50
500
50
600
50
700
λ


5,0
5
4,0
5
3,0
5
2,0
5
1,0
400
50
500
50
600
50
λ
1. log H_λ (rechts)
2. log H_λ (links)
bei 2 mm Spaltabstand
3. log H_λ (rechts)
4. log H_λ (links)
bei 4 mm Spaltabstand
für den Totalfarben blinden M.
5. log H_λ (r)
6. log J_λ für Lampe A
7. log H_λ unreduziert
8. log H_λ (r)
für den Totalfarbenblinden W

V.


Totalfarbenblinder M
Totalfarbenblinder W
Normale fovea [H. B.]
100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
ε_λ
λ
500
600
700

Lebenslauf.

Ich, Hedwig Bender, evangelischen Bekenntnisses, Tochter des Oberbürgermeisters a. D. Georg Bender und seiner Ehefrau Margarethe, geb. Conrad, bin am 29. Juni 1885 zu Thorn in Westpreussen geboren.

Den ersten Unterricht erhielt ich zu Hause. Von Ostern 1893 bis Ostern 1901 besuchte ich in Breslau zuerst die städtische Augustaschule, darauf die städtische Viktoriaschule.

Ostern 1902 trat ich in die städtischen Realgymnasialkurse für Mädchen ein und legte Ostern 1906 am Realgymnasium zum heiligen Geist die Reifeprüfung ab.

Seitdem studiere ich Naturwissenschaften und Mathematik an der Universität Breslau. Während des Sommersemesters 1908 studierte ich in München.

Ich hörte die Vorlesungen und Übungen der Herren Abegg †, Baumgartner, Franz †, Herz, Hintze, Hönigswald, Kaufmann, Kneser, Kowalewsky, Kükenthal, A. Ladenburg †, R. Ladenburg, Landsberg †, Lummer, E. Pringsheim, Sackur, Schaefer, Stern, Sturm, Rosanes, Rosen, Waetzmann in Breslau;

v. Baeyer, Geiger, Graetz, A. Pringsheim in München.

Ihnen allen danke ich für die freundliche Förderung, die ich durch sie erfahren habe.